บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของงานวิจัย

ถั่วแดงที่นำมาปลูกในประเทศไทยมี 2 สายพันธุ์หลักคือ ถั่วแดงหลวง ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Phaseolus vulgaris* L. แหล่งเพาะปลูกที่สำคัญอยู่ที่จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย น่าน และแม่ฮ่องสอน ซึ่งแหล่งปลูกถั่วแดงหลวงที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่จังหวัดเชียงใหม่ คือ ประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ของถั่วแดงที่ปลูกในประเทศไทย (กลุ่มงานพัฒนาพื้นที่สูง, 2550) และถั่วนิ้วนางแดง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Phaseolus calcaratus* Roxb. แหล่งปลูกที่สำคัญคือจังหวัดเลย (ปลูกมากที่อำเภอวงสะพุงและอำเภอเชียงคาน) และที่จังหวัดขอนแก่น พิษณุโลกและที่อื่นๆบางเล็กน้อย เช่น ที่จังหวัดเพชรบูรณ์และเชียงราย มีการนำถั่วแดงมาใช้เป็นอาหารได้ทั้งที่เป็นฝักสดและเมล็ดแห้ง ตัวอย่างเช่น ถั่วแดงต้มน้ำตาล หมูอบถั่วแดง แกงถั่ว โอสถ ห่อหมก ถั่วเสวย ซุบถั่วแดง เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลผลิตส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นอาหารสัตว์

ถั่วแดงเป็นพืชตระกูลถั่ว มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง แต่มีไขมันต่ำ องค์ประกอบทางเคมีของถั่วแดง (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง) มีโปรตีน 20-25 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 50-60 เปอร์เซ็นต์ มีแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ วิตามินหลากหลาย (Rehman และคณะ, 2001) โดยถั่วแดงมีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมมากกว่าถั่วเขียว มีวิตามินซีมากกว่าถั่วเหลือง มีปริมาณวิตามินบีและวิตามินซีมากกว่าถั่วลิสง (เกษตรกรรมธรรมชาติ, 2540) สารแอนตี้ออกซิแดนท์ (antioxidant) จำพวกสารประกอบฟีโนลิก (phenolics compound) ที่อยู่ในถั่วแดงมีสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระ (free radicals) และอนุมูลออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา จึงมีบทบาทสำคัญในการป้องกันความเสียหายของ DNA จากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation reaction) ที่จะเปลี่ยนสภาพของเซลล์แล้วเหนี่ยวนำทำให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บ (Madhujith และ Shahidi, 2005) ถั่วแดงยังมีประโยชน์เหมาะกับกลุ่มผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน เนื่องจากมีระดับของดัชนีไกลซิมิก (Gylcemic Index, GI) ต่ำ (Shimelis และ Rakshit, 2007) การบริโภคอาหารที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำ จะทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลให้ตับอ่อนไม่ต้องผลิตอินซูลินในปริมาณมาก อาหารประเภทนี้จึงควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดได้ และยังช่วยให้อิ่มท้อง จึงเหมาะกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก และชะลอการสร้างไขมันไตรกลีเซอร์ไรด์ (Triglyceride) ในเลือด เป็นการป้องกันหรือลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ นอกจากนี้อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ยังช่วยให้สมรรถภาพทางกีฬาสูงขึ้น ช่วยป้องกันโรคมะเร็งบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งมะเร็งลำไส้ใหญ่ (สถาบันวิจัยพืชไร่, 2549)

สารเลคตินที่สกัดได้จากถั่วแดงเรียกว่าไฟโตฮีแมกกลูตินิน (phytohaemagglutinin) นอกจากมีความสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อรา (antifungal activity) ยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งเอ็นไซม์ทรานสทริปเทส (transcriptase) ของเชื้อไวรัส HIV-1 ซึ่งเป็นเอ็นไซม์ที่สำคัญในการถอดรหัสพันธุกรรมของเชื้อ HIV และเอ็นไซม์เบต้ากลูโคซิเดส (β-glucosidase) (Ye และคณะ, 2001)

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าถั่วแดงมีสมบัติเฉพาะตัวที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย และเนื่องจากองค์ประกอบหลักของถั่วแดงคือคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจนำถั่วแดงมาผลิตเป็นแป้ง โดยทำการเตรียมแป้งจากถั่วแดงสองสายสายพันธุ์ของไทย คือถั่วแดงหลวงซึ่งเป็นถั่วแดงเม็ดใหญ่ และถั่วนิ้วนางแดงซึ่งเป็นถั่วแดงเม็ดเล็ก งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชที่เตรียมจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก รวมทั้งเปรียบเทียบกับแป้งที่มีขายตามท้องตลาดคือแป้งสาลี และแป้งถั่วเหลือง นอกจากนี้ทำการศึกษานำแป้งถั่วแดงที่ผลิตได้มาใช้ประโยชน์โดยการนำมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ ซึ่งเป็นอาหารว่างที่นิยมรับประทาน พกพาสะดวก เป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของแครกเกอร์และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับถั่วแดง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งที่ผลิตจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีของแป้งที่ผลิตจากถั่วแดงหลวง ถั่วนิ้วนางแดง กับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

1.2.3 ศึกษาปริมาณแป้งถั่วแดงที่เหมาะสมในการทดแทนแป้งสาลีในการผลิตแครกเกอร์

1.2.4 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งที่ผลิตจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก ซึ่งเป็นถั่วแดงสายพันธุ์หลักของไทย โดยเปรียบเทียบกับแป้งที่มีขายตามท้องตลาดคือแป้งสาลี และแป้งถั่วเหลือง นอกจากนี้ยังนำ

แป้งถั่วแดงที่ผลิตได้มาใช้ประโยชน์โดยการนำมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ เพื่อหาปริมาณการทดแทนแป้งสาลีที่เหมาะสม ที่ผู้บริโภคยอมรับมากที่สุด และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถั่วแดง

2.1.1 ถั่วแดงในประเทศไทย

ถั่วแดงที่นิยมปลูกในประเทศไทยมีสองสายพันธุ์หลัก คือ

1) ถั่วแดงหลวง

ถั่วแดงหลวง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Phasecolus vulgaris* L. มีถิ่นกำเนิดในแถบทวีปแอฟริกา นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยในปริมาณมากเมื่อปี 2514 โดยหม่อมเจ้าภีศเดช รัชนี องค์ประธานมูลนิธิโครงการหลวง (กลุ่มงานพัฒนาพื้นที่สูง, 2550) เพื่อจุดประสงค์ให้ชาวไทยภูเขาปลูกเป็นพืชทดแทนฝิ่น และช่วยรักษาความอุดมสมบูรณ์ของดินบนที่สูง ปัจจุบันถั่วแดงหลวงได้กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของชาวไทยภูเขาและเป็นที่สนใจของเกษตรกรในพื้นที่ราบทั่วไปในเขตภาคเหนือ ปริมาณผลผลิตของถั่วแดงหลวงที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในประเทศ ถั่วแดงนำไปใช้บริโภคในลักษณะที่แตกต่างกัน ถั่วแดงหลวงใช้บริโภคเมล็ดแก่ ซึ่งมีรูปร่างคล้ายไต ซึ่งเรียกว่า kidney bean และถ้ามีเมล็ดสีแดงด้วยก็เรียกว่า red kidney bean

ภาพที่ 2.1 ถั่วแดงหลวง

ถั่วแดงหลวง เป็นพืชผสมตัวเอง เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเล 500-1,500 เมตร น้ำหนักเมล็ด 100-1,000 มิลลิกรัม 1 ฝัก มี 4-5 เมล็ด รูปร่างของเมล็ดถั่วแดงหลวงมีลักษณะคล้ายไต มีตั้งแต่สีชมพู แดงอ่อน แดงเข้ม น้ำตาล เกือบดำ ถั่วแดงหลวงเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ ใบและลำต้นมีลักษณะคล้ายถั่วเหลืองมาก ลักษณะเป็นทรงพุ่มตั้งตรง มีความสูงตั้งแต่ 40-65 เซนติเมตร รูปร่างของใบส่วนมากด้านโคนใบจะกลมส่วนด้านปลายใบจะแหลมขนาดของใบกว้างประมาณ 5-10 เซนติเมตร และยาวประมาณ 8-15 เซนติเมตร ดอกของถั่วแดงหลวงจะรวมกันเป็นช่อ ดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศมีกลีบดอก 5 กลีบ กลีบเลี้ยง 5 กลีบ สีของดอกจะเป็นสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ฝักถั่วมีความยาวประมาณ 8-10 เซนติเมตร กว้าง 1.2-1.5 เซนติเมตร โดยเมล็ดมีความยาวประมาณ 0.8-1.5 เซนติเมตร และกว้างประมาณ 0.4 เซนติเมตร (สิงห์คำ และ กรีฑา, 2555) ถั่วแดงหลวงเป็นพืชวันสั้น คือ ออกดอกและตอบสนองต่อช่วงแสงสั้น การเจริญเติบโตมีทั้งแบบทอดยอด และไม่ทอดยอด

2) ถั่วนิ้วนางแดง

ถั่วแดงหรือถั่วนิ้วนางแดง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Phaseolus calcaratus* Roxb. เป็นพืชตระกูลถั่วที่ค่อนข้างรู้จักกันมากในปัจจุบัน เพราะเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง โดยในปี 2541 มีมูลค่าการส่งออกถึง 125.20 ล้านบาท แต่ปริมาณการส่งออก มีแนวโน้มลดลงจาก 8,991 ตัน ในปี 2540 เป็น 3,230 ตัน ในปี 2542 เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตลดลง แหล่งปลูกถั่วนิ้วนางแดงที่สำคัญได้แก่ จังหวัดเลย ในขณะที่ตลาดต่างประเทศต้องการปีละ 4,000-10,000 ตัน โดยเฉพาะญี่ปุ่นซึ่งถือว่าเป็นตลาดที่สำคัญ ยังคงนำเข้าและมีแนวโน้มนำเข้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากถั่วนิ้วนางแดงมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถั่วอัดซูกิ (adzuki bean) ซึ่งใช้ทดแทนกันได้และเป็นที่นิยมของคนญี่ปุ่น (เว็บบอร์ดไทยเกษตรศาสตร์, 2554) ตลาดส่งออกถั่วนิ้วนางแดงของไทย ได้แก่ ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐเกาหลีใต้ ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้ทำไส้ขนม การใช้ภายในประเทศมีน้อย จึงส่งออกเกือบทั้งหมด ปริมาณการผลิตของแต่ละปีขึ้นอยู่กับราคาที่เกษตรกรได้รับ ถ้าราคาดีจะผลิตมาก เพราะเป็นผลพลอยได้จากการปลูกข้าวโพด แหล่งปลูกที่สำคัญคือจังหวัดเลย (ปลูกมากที่อำเภอวงสะพุงและอำเภอเชียงคาน) และที่จังหวัดขอนแก่น พิษณุโลกและที่อื่นๆ บางเล็กน้อย เช่น ที่จังหวัดเพชรบูรณ์และเชียงราย เป็นต้น

ภาพที่ 2.2 ถั่วนิ้วนางแดง

ถั่วนิ้วนางแดงที่ปลูกในขณะนี้มีหลายชนิด แต่ที่ปลูกเป็นการค้าและปลูกมากเป็นถั่วแดงเมล็ดสีแดง ดอกสีเหลือง ฝักเล็กเท่าๆ กับถั่วเขียว แต่ยาวกว่าเล็กน้อย เมื่อแก่ฝักจะมีสีน้ำตาลอ่อนและสีดำ ฝักจะห้อยลงจากช่อเหมือนนิ้วมือ ฝักที่มีสีดำเมล็ดจะโตกว่าฝักสีน้ำตาลอ่อนเล็กน้อย ต้นเลื้อย ลำต้นและใบมีขนโดยทั่วไป เรียกว่า ถั่วแดงเมืองเลยหรือถั่วนิ้วนางแดง แต่ที่จังหวัดเลยเรียกว่า ถั่วท้องนา หรือบ้านนา เป็นพันธุ์ที่นำมาจากประเทศศรีลังกา เพื่อใช้เป็นพืชบำรุงดิน ชื่อเดิมเรียกว่า ถั่วแดงซีลอน ถั่วนิ้วนางแดงเป็นพืชที่ไวต่อแสง ปัจจุบันปลูกเป็นพืชแซมกับพืชชนิดอื่น เช่น ข้าวโพด (นาค, 2537)

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วแดง

ถั่วแดงเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง แต่มีไขมันต่ำ ในถั่วแดง 100 กรัม มีองค์ประกอบทางอาหาร ดังตารางที่ 2.1 กรมพัฒนาที่ดิน (2550) พบว่าถั่วแดงหลวงมีคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันเท่ากับ 63.5 กรัม , 18.2 กรัม และ 2.2 กรัม ตามลำดับ เกษตรกรรมธรรมชาติ (2540) พบว่าถั่วนิ้วนางแดงมีคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันเท่ากับ 64.5 กรัม , 18.5 กรัม และ 1.0 กรัมตามลำดับ กรมพัฒนาที่ดิน (2550) ได้รายงานว่าควรส่งเสริมให้ปลูกถั่วแดงให้มีปริมาณมากขึ้น และสนับสนุนให้มีการนำถั่วแดงมาบริโภคในประเทศให้มากขึ้น เพราะเป็นพืชอาหารที่มีโปรตีนสูงและราคาถูก สามารถนำถั่วแดงมาประกอบอาหารได้หลายชนิด เช่น ข้าวต้มมัด ต้มกับน้ำตาล หรือเชื่อมใส่น้ำแข็ง ไอศกรีม ทำไส้ขนมหวานต่างๆ ได้ รวมทั้งประกอบอาหารมังสวิรัติต่างๆ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วแดง (% น้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบทางเคมี	ถั่วแดงหลวง[a]	ถั่วนิ้วนางแดง[b]
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	346.0	335.0
(กรัมต่อ 100 กรัม)		
คาร์โบไฮเดรต	63.5	64.5
โปรตีน	18.2	18.5
ไขมัน	2.2	1.0
ไฟเบอร์	5.4	-
(มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)		
แคลเซียม	103.0	80.0
ฟอสฟอรัส	ND	400.0
เหล็ก	ND	5.0
โพแทสเซียม	130.5	ND
สังกะสี	1.9	ND
วิตามิน B1	0.5	0.3
วิตามิน B2	1.3	0.2
วิตามิน C	5.0	9.0
ไนอาซิน	ND	2.4

หมายเหตุ : ND หมายถึง ไม่มีข้อมูล

ที่มา : [a] กรมพัฒนาที่ดิน (2550)

[b] เกษตรกรรมธรรมชาติ (2540)

2.1.3 แป้งจากถั่วแดง

แป้ง (flour) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดจากกลูโคสจำนวนหลายพันโมเลกุลมาต่อกัน มีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสายยาวและกิ่งก้านสาขา แป้งมีมากในพืชประเภทเมล็ดและหัว

Siddiq และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตแป้งจากถั่วแดง ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำถั่วแดงนำมาแช่ในน้ำ โดยใช้น้ำเท่ากับ 4 เท่าของปริมาตรของถั่วแดง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำถั่วแดงที่ผ่านการแช่น้ำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดหยาบด้วยเครื่อง hammer mill แล้วจึงนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องบด pin mill ซึ่งใช้ตะแกรงบดแยกที่มีรูขนาด 0.25 มิลลิเมตร แป้งถั่วแดงที่เตรียมได้มีองค์ประกอบทางเคมี เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากถั่วอื่นๆ แสดงดังในตารางที่ 2.2 พบว่าแป้งถั่วแดงประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก มีปริมาณโปรตีนสูงและไขมันต่ำ นอกจากนี้แป้งถั่วแดงมีองค์ประกอบของโปรตีนน้อยกว่าแป้งถั่วเหลือง แต่มีไขมันต่ำเช่นเดียวกับแป้งถั่วเขียว

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วแดง 100 กรัม

ชนิดแป้ง	โปรตีน (g)	ไขมัน (g)	เถ้า (g)	เยื่อใย (g)	คาร์โบไฮเดรต (g)
Red kidney [a]	23.32	3.53	4.60	3.66	56.89
Small red kidney [a]	20.93	3.14	4.67	4.14	59.12
Mung bean [b]	26.37	1.10	4.30	4.30	59.80
Soy bean [c]	35.60	19.73	4.57	5.29	34.81

ที่มา : [a] Siddiq M. และคณะ (2010)

[b] Amarteifio และ Moholo (1998)

[c] Rehman และคณะ (2001)

2.2 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง

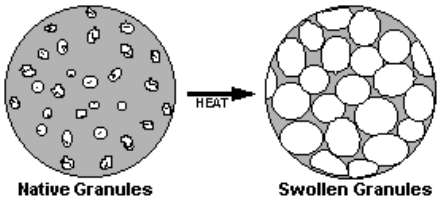
แป้งมีบทบาทที่สำคัญคือ ใช้เป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงของมนุษย์ แต่จากสมบัติเฉพาะตัวของแป้งจึงได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส ซุปและน้ำปรุงรสอาหาร ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการพาสเจอไรเซชัน (pasteurization) และสเทอริไรเซชัน (sterilization) เป็นต้น นอกจากใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว ยังมีการนำแป้งมาใช้อุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรมแป้งดัดแปร

2.2.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity)

เมื่อเติมน้ำลงในแป้ง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง และน้ำอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำและความชื้นในบรรยากาศ เมื่อผสมกันในระยะแรก พบว่าส่วนผสมมีสีขาวขุ่นในลักษณะแป้งแขวนลอยในน้ำ แต่ถ้าทิ้งไว้ระยะหนึ่ง พบว่าแป้งตกตะกอนแยกจากส่วนน้ำคล้ายกับก่อนผสม แสดงว่าเม็ดสตาร์ชในแป้งไม่ดูดซึมน้ำขณะเย็น หรือดูดซึมน้ำได้น้อยมาก ประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำที่ดูดเข้าไปจะอยู่ในส่วนอสัณฐาน ทำให้เกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถผันกลับได้ (reversible change) (อรอนงค์, 2547) ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์ แป้งที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง สามารถใช้เวลาในการผสมและการหมักนานได้ และทนต่อความแรงในระหว่างการผสมได้ดี

2.2.2 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ภายในเม็ดแป้ง (intermixed) ในส่วน crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่วน amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วน crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 2.3) โมเลกุลในส่วน crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)



ภาพที่ 2.3 การพองตัวของเม็ดแป้ง

ที่มา : Beynum และ Roels (1985)

จากวิธีของ Schoch (1964) โดยหาการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ในรูปของค่ากำลังการพองตัว (swelling power, SP) ซึ่งได้จากปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ และค่าความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของสตาร์ชทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ การพองตัวของเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช โดยมีปัจจัยที่ส่งผลคืออัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล ระดับความเป็นกิ่ง การจัดเรียงตัวและความยาวของสายกิ่งในอะไมโลเพกติน นอกจากนี้สิ่งเจือปนในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตก็มีผลต่อการพองตัว

2.2.3 การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง (Gelatinization)

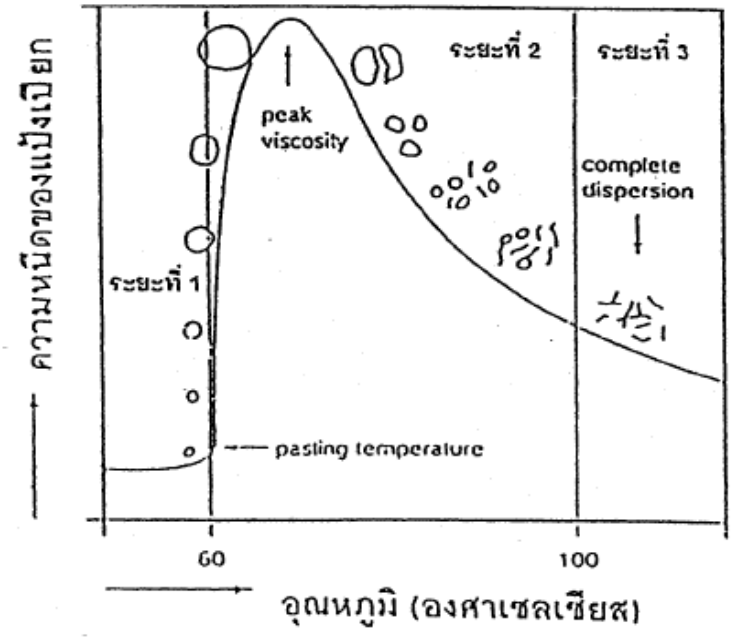
โมเลกุลของเม็ดแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นยาก ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง (ภาพที่ 2.4) เป็นดังนี้

ระยะที่หนึ่ง ในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวเล็กน้อย ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ birefringence ได้

ระยะที่สอง เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความข้นหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดมักเรียกจุดนี้ว่าอุณหภูมิเริ่ม

เปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกัน แล้วแต่ชนิดของแป้ง

ระยะที่สาม เมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกรูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล



ภาพที่ 2.4 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอกัน ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่างๆมีลักษณะการเกิดเจลที่ต่างกันออกไป (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

โดยช่วงการเกิดเจลาติไนเซชันจะแตกต่างกันขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการวัด อัตราส่วนน้ำต่อสตาร์ช ชนิดของสตาร์ชและโครงสร้างระดับโมเลกุล (Gunaratne และ Hoover, 2002 ; James, 1999) ซึ่งในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชัน ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล

สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry, DSC) เพื่อหาค่าพลังงานเอนทัลปีและช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดเจลาติไนเซชัน (conclusion temperature, T_c) โดยใช้หลักการวิเคราะห์จากค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (James, 1999) ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ชแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำต่อสตาร์ชที่ใช้ในการทดลอง (Appelqvist และ Debet, 1997) ซึ่งโดยปกติควรมีปริมาณน้ำอยู่อย่างน้อย 60 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ได้พีคการเปลี่ยนแปลงความร้อนเพียงพีคเดียว โดยไม่เกิดพีครบกวน (Gonera และ Cornillon, 2002) และสำหรับค่าพลังงานเอนทัลปีคือพลังงานที่ใช้ในการทำลายความเป็นผลึกในโครงสร้าง แต่ในปัจจุบันพบว่าน่าจะเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (double helixes) ภายในโครงสร้างมากกว่า โดยการสูญเสียความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่นั้นน่าจะเกิดขึ้นพร้อมๆกันมากกว่าจะเกิดการสูญเสียความเป็นผลึกก่อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงยึดเกาะกันภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นกับระดับการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่มากกว่าระดับความเป็นผลึกในโครงสร้าง (Appelqvist และ Debet, 1997)

2.2.4 สมบัติทางความหนืดของแป้ง (Pasting properties)

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น พฤติกรรมความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย โดยโมเลกุลของอะไมโลสที่ซึมออกมาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหนืด (Kokini และคณะ, 1992) เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้นความหนืดลดลง (breakdown) (Wang และคณะ, 2000) ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง

แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูงที่สุด และมีความสามารถในการทำให้ข้นหนืด (thickening power) สูงด้วย ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำเนื่องจากเม็ดแป้งมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสและไขมัน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล , 2546)

การติดตามพฤติกรรมของแป้งขณะได้รับความร้อนและแรงกลจากการกวนสามารถติดตามได้โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender Viscoamylograph) ซึ่งจะได้รูปกราฟดังภาพที่ 2.5 จุดสำคัญบนเส้นกราฟที่ใช้พิจารณาสมบัติของแป้งได้แก่

1) อุณหภูมิเพสทิง (pasting temperature) เป็นอุณหภูมิที่มีความหนืดของเพสต์เริ่มปรากฏ อุณหภูมินี้แปรผันตามชนิดของแป้งและการดัดแปร รวมถึงการมีสารเติมแต่งในสารละลาย (จุด A)

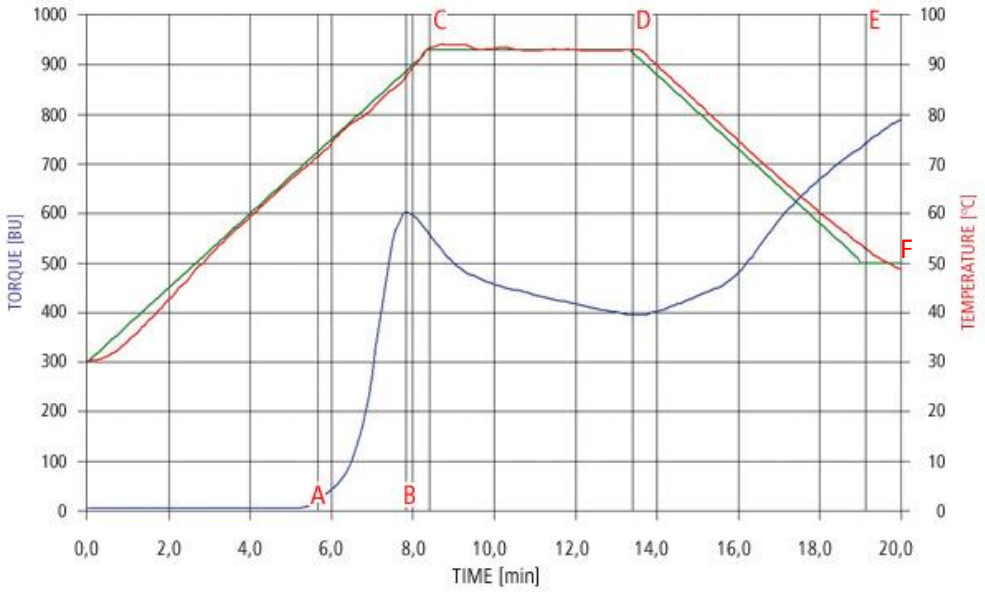
2) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดบนกราฟที่มีความหนืดสูงสุดปรากฏ โดยทั่วไปการต้มแป้งให้สุกจะต้องผ่านระยะนี้ (จุด B)

3) ความหนืดที่ 95 องศาเซลเซียส ความหนืดที่อุณหภูมินี้จะสะท้อนถึงความง่ายของการต้มแป้งให้สุก (จุด C)

4) ความหนืดที่ 95 องศาเซลเซียส จะแสดงหรือชี้บอกเสถียรภาพของเพสต์หรือแป้งเหนียวระหว่างการต้มแป้งภายใต้แรงเฉือนต่ำ (จุด D)

5) ความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส ความหนืดที่จุดนี้จะช่วยวัดการคืนตัว (setback) ของเพสต์ร้อนเมื่อทำให้เย็น (จุด E)

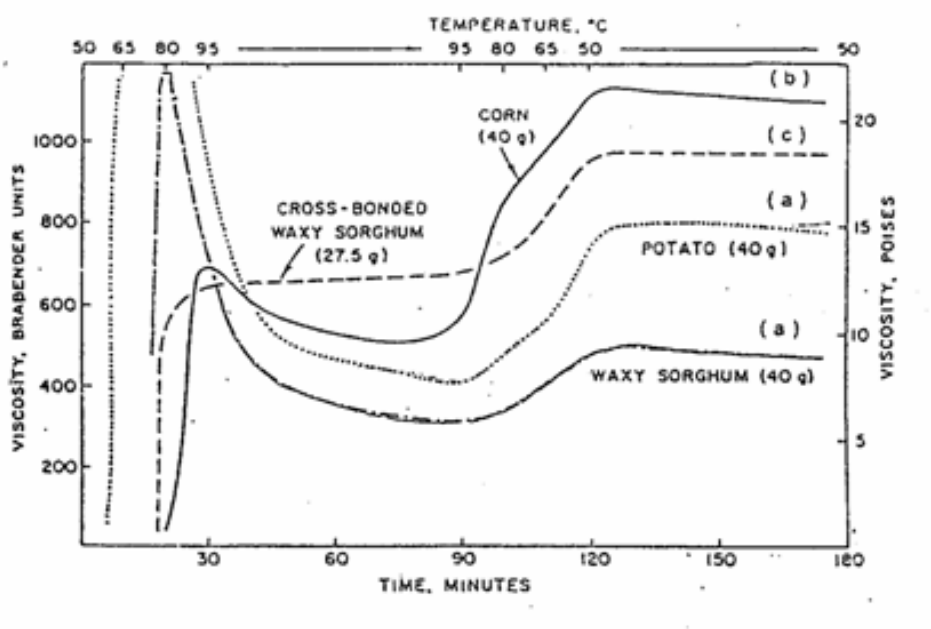
6) ความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส จะแสดงหรือชี้บอกเสถียรภาพของเพสต์สุกภายใต้สภาวะจำลอง (จุด F) (บุญทิวา, 2548)



ภาพที่ 2.5 จุดสำคัญบนเส้นกราฟของเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender Viscoamylograph)
ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นมาอีกนี้เรียกว่า setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสตาร์ช สมบัติทางกายภาพและเคมีของเม็ดสตาร์ช เช่น ขนาดของเม็ดสตาร์ช การกระจายตัวขนาดของเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน และปริมาณแร่ธาตุ (Singh, 2003)

จากการแบ่งประเภทแป้งตามกราฟแสดงพฤติกรรมความหนืด ตามวิธีของ Schoch และ Maywald (1968) ซึ่งรูปแบบความหนืดของแป้งสุกจากแป้งชนิดต่างๆที่วัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender viscoamylograph) แบ่งได้ 4 แบบดังรูปที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 รูปแบบความหนืดของแป้งสุกจากแป้งชนิดต่างๆ

ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

1) แบบ a เป็นลักษณะของกราฟที่ได้จากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวสูง (high swelling starch) ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้ง waxy จากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนแก่พืชเหล่านี้เม็ดแป้งจะมีการพองตัวมาก ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลงและเม็ดแป้งจะแตกออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ดังนั้นลักษณะกราฟของความหนืดจึงสูงชันแล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

2) แบบ b เป็นกราฟของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวปานกลาง (moderate-swelling starch) ได้แก่แป้งจากธัญพืชทั่วไป เนื่องจากเม็ดแป้งจะไม่พองตัวมากถึงกับแตกออกลักษณะกราฟของความหนืดจึงสูงชันน้อยกว่า และเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่า

3) แบบ c เป็นกราฟของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวจำกัด (restricted-swelling starch) ได้แก่ แป้งถั่วต่างๆ และแป้งแปรสภาพทางเคมีโดยการ cross-linked การ cross-linked ภายในเม็ดแป้งทำให้การพองตัวและการละลายลดลงและยังทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นลักษณะกราฟของความหนืดจึงไม่ปรากฏยอดสูงสุด แต่มีค่าความหนืดสูงซึ่งอาจจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นระหว่างการต้มสุก

4) แบบ d เป็นกราฟของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก (highly-restricted swelling starch) ได้แก่ แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เช่น แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลส 55-70 เปอร์เซ็นต์

2.2.5 ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง และการละลาย (Freeze-thaw stability)

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวขึ้นมาจนถึงจุดที่พองตัวขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะ-ไมโลสขนาดเล็กจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดเรียงตัวด้วยพันธะไหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradaion) หรือการคืนตัว เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การเกิดซินเนอริซิส (syneresis) ของแป้งสุก เมื่อเก็บในที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีน้ำถูกขับออกมาจากแป้งสุก ผู้บริโภคอาจเข้าใจผิดว่าอาหารนั้นเน่าเสียจากจุลินทรีย์ วิธีการวิเคราะห์ความคงตัวในการเก็บ อาจทำโดยเก็บแป้งสุกที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 4-6 เดือน และวัดปริมาณน้ำที่ถูกขับออกมาเป็นระยะๆ แต่วิธีการนี้ต้องใช้เวลานาน ถ้าต้องการความรวดเร็วอาจปรับวิธีการโดยนำแป้งสุกแช่แข็งและละลายหลายๆรอบ วัดปริมาณน้ำที่ถูกขับออกมาในแต่ละรอบ ซึ่งแต่ละรอบจะเทียบเท่าได้กับการเก็บนาน 2-3 อาทิตย์

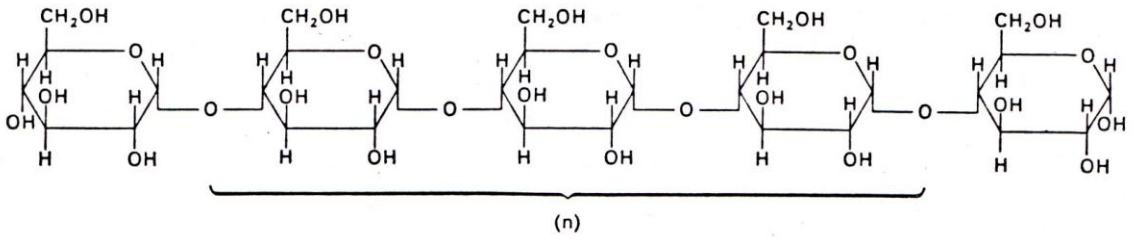
ปัญหาในการเกิดซินเนอริซิสอาจแก้ไขได้โดยเติมหมู่แทนที่เช่นหมู่ฟอสเฟต ซึ่งมีสภาพเป็นประจุ จะเกิดการผลักกันของโมเลกุลแป้งหรือเติมหมู่เอสเทอร์ หมู่อีเทอร์ที่เติมเข้าไปในแป้งจะทำให้มีโครงสร้างที่ระเกะระกะขัดขวางการรวมตัวของโมเลกุลแป้ง

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกแตกต่างกัน การคืนตัวของน้ำแป้งมีปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็ว

โดยทั่วไปแป้งจากราก หัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก หัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย อาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กันระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง หรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพกตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

2.3 สตาร์ช (starch)

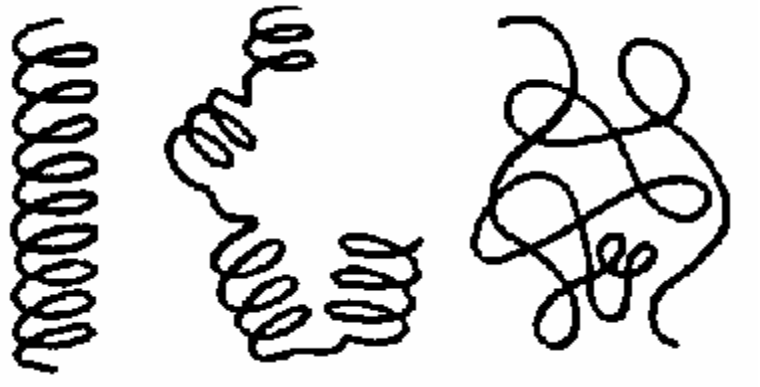
สตาร์ช (starch) คือ พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นแหล่งสะสมอาหารของพืช พบในเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด และพืชหัว เช่น มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง โมเลกุลของสตาร์ช เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ซึ่งมีโครงสร้างของโมเลกุล 2 รูปแบบคือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดสตาร์ช



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา : Horton และคณะ (1996)

อะไมโลส เป็นส่วนประกอบหลักของสตาร์ช โมเลกุลของอะไมโลสเป็นโพลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลดี-กลูโคส (D-glucose) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ชนิดแอลฟา 1,4 ประมาณ 250-2,000 หน่วย (ภาพที่ 2.8) แป้งจากพืชต่างชนิดกันมีปริมาณอะไมโลสต่างกัน ที่เหลือเป็นอะไมโลเพกติน (amylopectin) อะไมโลสทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน โครงสร้างของอะไมโลส เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ดังภาพที่ 2.9 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสมีโมเลกุลเป็นแบบม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หน่วย อาจจะมีบางส่วนละลายได้โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส

ที่มา : Horton และคณะ (1996)

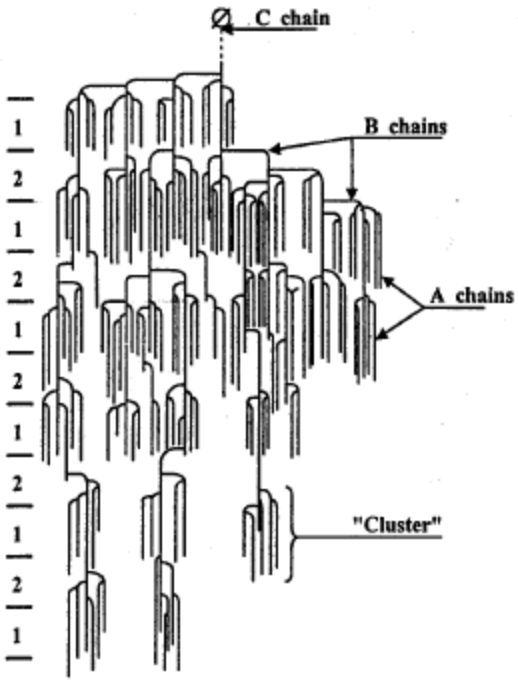
แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง มันฝรั่ง แป้งสาคู มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ไม่มีอะไมโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะไมเลส (amylomaize) มีอะไมโลสสูงมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)
ข้าวสาลี	25.8
ข้าวโพด	22.5
ข้าวเจ้า	20.5
ข้าวบาร์เลย์	23.6
มันฝรั่ง	16.9
มันสำปะหลัง	17.8

ที่มา : Kasemsuwan และคณะ (1999)

อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสตาร์ช (starch) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส (glucose) ที่จัดเรียงตัวเป็นโซ่ที่มีกิ่งก้านสาขา โดยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ที่กิ่งก้านสาขาคือพันธะแอลฟา -1, 6 (ภาพที่ 2.10)



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างอะไมโลเพกติน

ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

อะไมโลเพกตินถือว่ามีความสำคัญมากกว่าอะไมโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน (Oates, 1997) ปริมาณของอะไมโลเพกตินในแป้งชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณของอะไมโลเพกตินในแป้งชนิดต่างๆ

แป้ง	ปริมาณอะไมโลเพกติน (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)
ข้าวสาลี	72
ข้าวโพด	72
มันฝรั่ง	79
มันสำปะหลัง	83
ข้าวโพดเหนียว	100

ที่มา : Swinkels (1985a)

2.3.1 การผลิตสตาร์ช

สตาร์ช (starch) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาผ่านกระบวนการกำจัดส่วนของโปรตีนที่อยู่ร่วมกับสตาร์ชออกไป (พนอจิต, 2531) จนมีความบริสุทธิ์สูงมาก Tester (1997) กล่าวว่าสตาร์ชที่มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสตาร์ชที่มีความบริสุทธิ์สูง การแยกโปรตีนมักใช้การแยกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลายๆครั้งและล้างออกด้วยน้ำ จากนั้นแยกน้ำและนำตะกอนที่ได้มาอบแห้ง (ศยามล, 2544)

2.3.2 ลักษณะทางโครงสร้างของสตาร์ช

1) ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ช (granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดสตาร์ชมีขนาดรูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของสตาร์ชนั้นๆ ดังตารางที่ 2.5 เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งและแป้งพุทธรักษามีลักษณะเป็นรูปไข่ขนาดใหญ่ ถือได้ว่ามีขนาดใหญ่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งอื่นๆ เม็ดแป้งสาลี บาร์เลย์และข้าวไรน์มี 2 แบบคือ แบบ A มีรูปร่างแบบ lenticular ขนาด 10-30 ไมครอน และแบบ B รูปร่างกลม มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน เม็ดสตาร์ชแบบ B มีจำนวนมากกว่าคือประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนเม็ดสตาร์ชทั้งหมด แต่ถ้าเทียบเป็นน้ำหนักแล้วจะคิดเป็นเพียง 20-30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ส่วนเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดปานกลาง (20 ไมครอน) ขนาดใกล้เคียงกับเม็ดสตาร์ชข้าวโพด (Kerr, 1950) สำหรับเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้ามีขนาดค่อนข้างเล็กตรงกันข้ามกับเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งซึ่งมีขนาดใหญ่มาก มีความหนาแน่นทำให้สุกง่าย ส่วนเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปร่างกลมปลายเม็ดถูกตัดและมีขนาด 3-9 ไมครอน ในเม็ดสตาร์ชยังมีแร่ธาตุ ลิพิด โปรตีน เป็นองค์ประกอบอยู่บ้างเล็กน้อย (นิธิยา, 2545)

ตารางที่ 2.5 รูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ได้จากแหล่งต่างๆ

แหล่งของสตาร์ช	ขนาด (ไมโครเมตร)	รูปร่าง
ข้าวเจ้า [a]	3-8	ทรงหลายเหลี่ยม
ข้าวโพด [a]	5-25	ทรงหลายเหลี่ยม
มันฝรั่ง [a]	15-100	กลมรีคล้ายไข่
ข้าวสาลี [a]	2-38	กลมแบน และ ทรงหลายเหลี่ยม
ข้าวฟ่าง [a]	4-12	ทรงกลม และ ทรงหลายเหลี่ยม
มันสำปะหลัง [a]	4-35	ทรงกลม และ ทรงหลายเหลี่ยม
ถั่ว [b]	5-10	คล้ายเม็ดถั่ว

ที่มา : [a] Blanshard (1987)

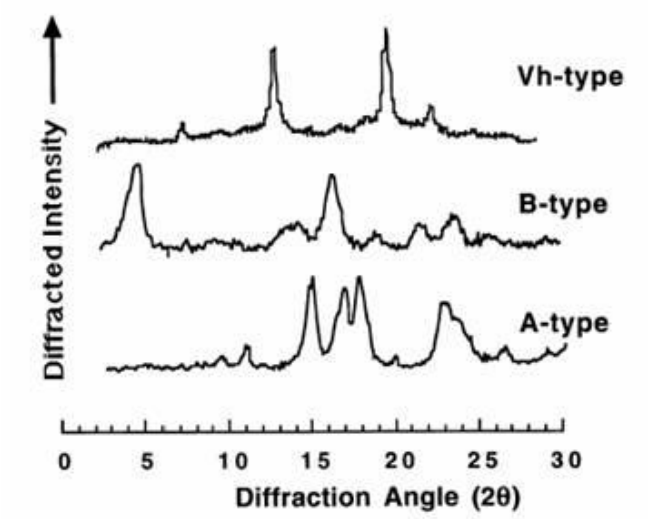
[b] Tester and Karkalas (2002)

2) ชนิดและปริมาณของผลึก

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินจะเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystallite) และส่วนอสัณฐาน (amorhous หรือ gel phase) ส่วนสายโซ่สั้นของอะไมโลเพกตินจะเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลส และสายโซ่ของอะไมโลเพกติน เม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืชต่างๆ) ถ้าเรียงตัวกันอย่างหลวมๆจะเกิดผลึกแบบ B (สตาร์ชจากพืชหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว) โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันจะได้ลักษณะการกระจายตัวของแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชได้โดยใช้เทคนิครังสีเอ็กซ์ (Wild Angle X-ray Diffraction, WAXD) สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ต่างกัน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

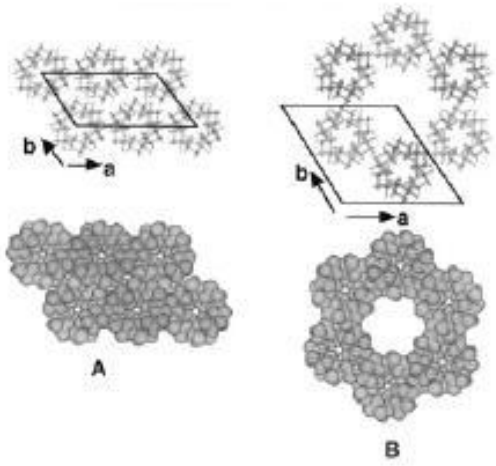
โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wild Angle X-ray Diffraction (WAXD) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ x-ray diffraction ต่างกันดังภาพที่ 2.11 แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 17° และ 18° และพีคเดี่ยวที่ 23° แต่ไม่มีพีคที่ 5.6° แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มี

ลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 5.6° และ 17° แต่ไม่มีพีคที่ 18° และมีพีคคู่ (doublet) ที่ 22° และ 24° ซึ่งได้แก่แป้งจากพืชหัวและแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 5.6° และ 17.9° ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้นและแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการปฏิบัติ (treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งชื้นที่ถูกบ่มไว้นานที่อุณหภูมิสูง (110 องศาเซลเซียส, 30 นาที : heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นชนิด B ไปเป็นชนิด A (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)



ภาพที่ 2.11 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน

ที่มา : Buleon และคณะ (1998)



ภาพที่ 2.12 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ในโครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B
ที่มา : Buleon และคณะ (1998)

ลักษณะผลึกแบบ A และ B มีความแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ (double helices) และปริมาณในโครงสร้างดังภาพที่ 2.12 โดยผลึกแบบ B การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นแบบเฮกซะโกนอลยูนิตเซลล์ (hexagonal unit cell) โดยมีช่องว่างขนาดใหญ่ตรงกลางซึ่งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ 36 โมเลกุลต่อยูนิตเซลล์ ในขณะที่ผลึกแบบ A การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นแบบโมโนคลินิคยูนิคเซลล์ (monoclinic unit cell) ซึ่งมีสายเกลียวคู่ตรงกลางของโครงสร้างโมเลกุลสามารถจับน้ำได้น้อยกว่า (Gunaratne และ Hoover, 2002)

2.4 แครกเกอร์

จัดเป็นขนมปังกรอบประเภทหนึ่งที่แตกต่างไปจากบิสกิตและคุกกี้ จากการแบ่งตามส่วนผสม วิธีการทำ รูปร่างและขนาด เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนประกอบหลัก และมีส่วนประกอบรองอื่นๆ อาจปรุงแต่งกลิ่นรสด้วยหรือไม่ก็ได้ หรือบางกรณีอาจมีการเติมแต่งด้วยสารประกอบอื่นๆ ที่สามารถมองเห็นส่วนประกอบที่ใช้ ในบางกรณีแครก-เกอร์อาจเรียกว่าบิสกิต เนื่องจากทั้งสองมีลักษณะไม่แตกต่างอย่างชัดเจน (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม, 2538) แครกเกอร์เป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีสูตรคล้ายขนมปัง มียีสต์กับโซดาหรือผงฟูอยู่ในส่วนผสม แต่จะมีส่วนผสมของน้ำหรือของเหลวน้อยจึงมีลักษณะโดแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะกรอบแข็งเป็นชั้นๆ (อรอนงค์, 2547)

ส่วนผสมของแครกเกอร์ประกอบด้วย แป้งสาลี น้ำ สารให้ความอ่อนตัวคือ ไขมัน สารให้ความพองตัว เช่น ยีสต์ โซดา ผงฟู เป็นต้น สารให้รสชาติคือ เกลือ น้ำตาล น้ำนม และสิ่งปรุงแต่งอื่นๆ เช่นผลไม้ถั่วแห้ง ลูกนัต มะม่วงหิมพานต์ โกโก้ ช็อกโกแลต สีและกลิ่นรสต่างๆ โดยมีแป้งสาลีเป็นองค์ประกอบสำคัญในสูตรมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่า จึงมีผลโดยตรงต่อลักษณะโครงร่าง (อรอนงค์, 2547)

2.4.1 ชนิดของแครกเกอร์

แครกเกอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป หากแบ่งแครกเกอร์ตามส่วนผสม วิธีการทำ รูปร่างและขนาด รวมถึงการเติมแต่ง เช่น การเคลือบ การสอดไส้ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2538) สามารถแบ่งได้ดังนี้

1) โซดาแครกเกอร์ (soda cracker) หรือซอลทีนแครอกเกอร์ (saltine cracker) เป็นแครกเกอร์ที่มีรสไม่หวาน ทำจากแป้งผสมกับไขมัน 8-10 เปอร์เซ็นต์ ยีสต์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และเกลือ อาจเติมมอลต์หรือมอลต์ไซรัป และใช้เวลาหมักนาน โดยทั่วไปเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 50×50 ตารางมิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร มีรู 9 รู จัดอยู่ใน 3 แถว ด้านบนเป็นสีน้ำตาลสม่ำเสมอ ด้านล่างเรียบมีรอยพองเล็กๆกระจายทั่วไป โครงสร้างภายในเป็นชั้นๆ

2) ครีมแครกเกอร์ (cream cracker) เป็นแครกเกอร์ที่มีรสไม่หวาน ทำจากแป้งผสมกับไขมัน 12-18 เปอร์เซ็นต์ ยีสต์ 1.0-2.4 เปอร์เซ็นต์ และเกลือ 0.9-1.5 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาหมักนาน โดยทั่วไปเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 65×75 ตารางมิลลิเมตร ลักษณะบาง ผิวหน้าไม่เรียบมีสีอ่อน มีรอยพองกระจายทั่วไป โครงสร้างภายในเป็นชั้นๆ ลักษณะเนื้อจะนุ่ม กรอบ ซึ่งเมื่อละลายในปากจะไม่แตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย

3) สแนกแครกเกอร์ (snack cracker) เป็นแครกเกอร์ที่มีรสหวาน ทำจากแป้งผสมไขมันและน้ำตาลหรือไซรัปเล็กน้อย อาจใช้ยีสต์หรือสารเคมี ส่วนใหญ่จะใช้สารเคมี อาจใส่เกลือหรือผงแต่งกลิ่นรส เช่น สมุนไพรหรือผงเนยแข็ง กลิ่นรสได้จากไขมันที่พ่นผิวหน้าขณะร้อนและสิ่งแต่งหน้า ลักษณะต่างจากซอลทีนแครกเกอร์และครีมแครกเกอร์ที่มีเนื้อแน่นกว่า และเมื่อกัดจะรู้สึกนุ่มกว่า (cream cracker)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จุฑา (2544) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งข้าวกล้องต่อแป้งสาลีในแครกเกอร์ และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งข้าวกล้องทดแทนแป้งสาลี โดยใช้อัตราส่วน 10:90 , 20:80 , 30:70 และ 40:60 และรวบรวมข้อมูลโดยทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส ใช้ผู้ชิม 10 คน วัดผลโดยให้คะแนนแบบ 9-Point Hedonic Scale ผลการวิจัยพบว่าสามารถใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวกล้องต่อแป้งสาลี เท่ากับ 20:80 โดยการทดแทนนี้ยังคงได้รับการยอมรับจากผู้ชิมในระดับตั้งแต่ยอมรับปานกลางจนถึงยอมรับมาก ซึ่งในแง่คุณค่าทางโภชนาการยังสามารถได้รับสารอาหารประเภทใยอาหาร วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และไนอาซินเพิ่มขึ้น

นวรัตน์ และคณะ(2553) ศึกษาผลของปริมาณข้าวเหนียวดำและกระบวนการผลิตที่มีต่อคุณภาพของแครกเกอร์ พบว่าข้าวเหนียวดำมีปริมาณโปรตีน 9.39 เปอร์เซ็นต์ และเถ้า 1.5 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าข้าวเหนียวขาว จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์อะไมโลกราฟ พบว่าข้าวเหนียวดำมีอุณหภูมิในการเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงกว่าข้าวเหนียวขาว แต่มีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 50องศาเซลเซียส ต่ำกว่าข้าวเหนียวขาว เมื่อนำข้าวเหนียวดำมาผลิตเป็นแครกเกอร์ พบว่าการเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวดำ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่าการขยายตัวในเชิงปริมาตรของแครกเกอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ไม่มีผลต่อคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส และจากการตรวจสอบผลของระยะเวลาในการแช่เย็นของแผ่นแป้งที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงต่อคุณภาพของแครกเกอร์ที่มีปริมาณข้าวเหนียวดำ 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระยะเวลาในการแช่เย็นของแผ่นแป้ง ทำให้แครกเกอร์มีค่าการขยายตัวเชิงปริมาตร ค่าความหนาแน่น ค่าความแข็ง และคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

Jeeyup และคณะ (2010) ศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ปราศจากกลูเตน (gluten free) เพื่อช่วยเหลือผู้ที่ป่วยเป็นโรคแพ้กลูเตน โดยได้นำถั่วที่มีใช้ทางการค้า 9 ชนิดมาผลิตเป็นแครกเกอร์ ได้แก่ ถั่วลูกไก่ (chickpea) ถั่วเขียว (green lentil) ถั่วแดง (red lentil) ถั่วเหลือง (yellow pea) ถั่วพินโต (pinto) ถั่วขาว (navy bean) โปรตีนจากถั่ว (pea protein) สตาร์ช (starch) และเส้นใยสกัด (fiber isolates) จากการทดลองพบว่าแครกเกอร์ที่ผลิตจากถั่วลูกไก่ (chickpea) มีลักษณะทางกายภาพและคุณค่าทางโภชนาการ ใกล้เคียงกับแครกเกอร์ที่มีขายในท้องตลาดมากที่สุด เมื่อทำการทดสอบความชอบของผู้ชิม พบว่าผู้ชิมให้คะแนนแครกเกอร์ที่ผลิตจากแป้งถั่วลูกไก่สูงสุด และยังพบอีกว่าแครกเกอร์ที่ผลิตจากถั่วลูกไก่มีปริมาณแร่ธาตุที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสูงกว่าแครกเกอร์มีขายในท้องตลาด 5-6 เท่า

Alex และคณะ (2008) ทดลองผลิตแผ่นตอร์ตียา (tortilla) โดยใช้แป้งถั่วแดง ถั่วดำ และถั่วขาว ทดแทนแป้งสาลีที่ระดับ 15 , 25 และ 35 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและลักษณะเนื้อสัมผัสของแผ่นตอร์ตียาที่ผลิตได้ พบว่าแผ่นตอร์ตียาที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วชนิดต่างๆ มีปริมาณสารอาหาร โปรตีน และสารประกอบโพลีฟีนอลที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงกว่าแผ่นตอร์

ตียาที่ผลิตด้วยแป้งสาลี แผ่นตอร์ตียาที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วชนิดต่างๆที่ระดับ 35 เปอร์เซ็นต์ มีสารประกอบโพลีฟีนอลที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุด เมื่อทำการทดสอบความชอบ พบว่าผู้ชิมยอมรับแผ่นตอร์ตียาที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วชนิดต่างๆได้มากสุดที่ระดับการทดแทน 25 เปอร์เซ็นต์

Alex และคณะ (2009) ศึกษาการทดแทนแป้งข้าวโพดด้วยแป้งถั่วขาวและแป้งถั่วแดงที่ระดับ 15, 30 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ที่ผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูดชั่นด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์สกรูคู่ โดยควบคุมความเร็วไว้ที่ 150 รอบต่อนาที ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสุดท้ายที่ 160 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผ่านกระบวนการเอ็กทรูดชั่นมีลักษณะเนื้อสัมผัสแน่นและแข็ง การพองตัวน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผลิตด้วยแป้งข้าวโพด พบว่าสามารถใช้แป้งถั่วขาวและแป้งถั่วแดงทดแทนแป้งข้าวโพดได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผลิตได้มีระดับปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น 12 เปอร์เซ็นต์ และสารประกอบโพลีฟีนอลที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ทดแทนแป้งข้าวโพดด้วยแป้งถั่วแดงจะมีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระมากกว่าการทดแทนด้วยแป้งถั่วขาว

Siddiq และคณะ (2010) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งจากถั่ว 4 ชนิด ได้แก่ red kidney , small red kidney , cranberry และ black bean ที่เจริญเติบโตในประเทศอเมริกา พบว่าแป้งถั่ว black bean และ red kidney ที่ผลิตได้มีค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) 0.515 และ 0.556 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption) ของแป้งถั่ว small red kidney และ black bean เท่ากับ 2.65 และ 2.23 กรัมต่อกรัมของแป้ง ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับน้ำมัน (oil absorption) ของแป้งถั่ว small red kidney และ red kidney เท่ากับ 1.23 และ 1.52 กรัมต่อกรัมของแป้ง ตามลำดับ ค่าความสามารถในการเป็นอิมัลชัน (emulsion capacity) และการเกิดโฟม (foaming capacity) ของแป้งถั่วขึ้นอยู่กับชนิดของถั่ว โดยสามารถนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาไปใช้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่แตกต่างกัน

Terrence และ Fereidoon (2005) ศึกษาสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (antioxidant) ในถั่วตระกูล *Phaseolus vulgaris* L. ได้แก่ white kidney , red pinto , swedish brown และ black kidney และทำการสกัดสารประกอบฟีโนลิกด้วยอะซิโตน 80 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำมาตรวจสอบปริมาณสารประกอบฟีโนลิกและความสามารถในการจับอนุมูลอิสระ พบว่าที่เปลือกถั่วมีสารประกอบฟีโนลิกอยู่ในช่วง 6.7-270 มิลลิกรัมต่อกรัม และเนื้อถั่วอยู่ในช่วง 4.9-93.6 มิลลิกรัม/กรัม การวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Trolox equivalents antioxidant capacity (TEAC assay) พบว่าถั่วสีแดงและสีน้ำตาลมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูงกว่าถั่วสีดำ สรุปได้ว่าถั่วที่มีสีจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูงกว่าถั่วที่มีสีขาว โดยสารประกอบฟีโนลิกจะช่วยป้องกันการเกิดคลอเรสเตอรอล (Low Density Lipoprotein, LDL) ได้

สิงห์คำ และ กรีฑา (2555) ได้ทำการสกัดสารสกัดหยาบจากถั่วแดงหลวง และนำสารสกัดหยาบที่ได้มาทดสอบผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดนิวเคลียสเดี่ยว ด้วยวิธี MTT assay โดยใช้ความเข้มข้นของสารสกัดหยาบตั้งแต่ 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นอกจากนี้ยังศึกษาผลของสารสกัดหยาบในการกระตุ้นการแบ่งตัวแบบไมโตซีสของเซลล์ในเลือดโมโนนิวเคลียร์ (PBMCs) เพื่อศึกษาโครโมโซมด้วยวิธี conventional chromosome culture and karyotyping จากการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบจากถั่วแดงหลวงมีแนวโน้มในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์ PBMCs ได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น และระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถกระตุ้นได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามสารสกัดหยาบจากถั่วแดงหลวงที่ความเข้มข้นสูงๆ (50 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เริ่มทำให้การเจริญเติบโตของเซลล์ PBMCs มีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดหยาบจากถั่วแดงหลวงที่ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถกระตุ้นให้เซลล์ PBMCs แบ่งตัวแบบไมโตซีส และมีโครโมโซมระยะเมตาเฟสได้มากที่สุด

ปิยรัตน์ (2545) ศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชและแป้งจากถั่วหรั่งพบว่าแป้งถั่วหรั่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เท่ากับ 58.38 , 15.48 , 7.90 , 4.16 และ 2.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สตาร์ชถั่วหรั่งมีปริมาณอะไมโลส 21.67 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างเม็ดสตาร์ชเป็นทั้งแบบวงรีและแบบทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 31.11 ไมโครเมตร โครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ปริมาณผลึก 43.69 เปอร์เซ็นต์ มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนซ์ (T_0) 71.69 องศาเซลเซียส และค่าเอนทัลปี (ΔH) 11.73 จูลต่อกรัม มีค่าการดูดซับน้ำและน้ำมัน 1.67 และ 1.01 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ

บทที่ 3
วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 ถั่วแดงหลวงพันธุ์หมากจ๋าม จากมูลนิธิโครงการหลวง และถั่วนิ้วนางแดง จากตลาดไท เมล็ดถั่วมีสีแดง รูปร่างคล้ายไต เมล็ดสมบรูณ์ไม่มีตำหนิ เช่น รูแมลงเจาะ

3.1.2 แป้งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม (full fat soy flour) ตราเบเกอรี่แลนด์ ผลิตในประเทศไทย

3.1.3 แป้งสาลีอเนกประสงค์ (all purpose flour) ตราว่าว บริษัทยูเอฟเอ็มฟู้ดเซ็นเตอร์ จำกัด ผลิตในประเทศไทย

3.2 วัตถุดิบในการผลิตแครกเกอร์

3.2.1 แป้งสาลีเอนกประสงค์ (ตราว่าว, บ.ยูเอฟเอ็มฟู้ดเซ็นเตอร์ จำกัด, ประเทศไทย)

3.2.2 ยีสต์ผง (ตราเฟอร์เฟค, ห้างหุ้นส่วนจำกัด เกรทฮิลล์, ประเทศไทย)

3.2.3 เกลือ (ตราปรุงทิพย์, บ.อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด, ประเทศไทย)

3.2.4 นมผง (ตราเบเกอรี่แลนด์, ประเทศไทย)

3.2.5 เนยขาว (ตราแซมซั่น, บ.เกตุวานิชอุตสาหกรรม จำกัด, ประเทศไทย)

3.2.6 น้ำมันพืช (ตราองุ่น, บ.น้ำมันพืชไทย จำกัด, ประเทศไทย)

3.2.7 น้ำตาลทราย (ตรามิตรผล, บ.น้ำตาลมิตรผล จำกัด, ประเทศไทย)

3.2.8 โซเดียมไบคาร์บอเนต (ตราเบสท์โอเดอร์, บ.เบสท์โอเดอร์ จำกัด, ประเทศไทย)

3.2.9 ผงฟู (ตราเบสท์โอเดอร์, บ.เบสท์โอเดอร์ จำกัด, ประเทศไทย

3.2.10 โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์

3.3 วัสดุ และอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องบดแบบหยาบ (hammer mill)

3.3.2 เครื่องบดแบบเข็ม (pin mill) Retsh ZM 1000, Gemany

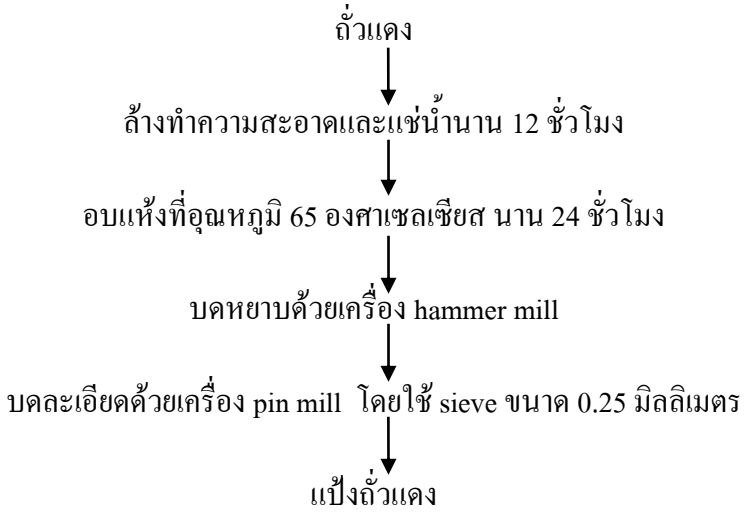
3.3.3 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) Memmert UM 400, Germany

3.3.4 เครื่องสกัดแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)	Beckman Coulter, USA
3.3.5 UV-VIS สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	Shimadzu UV-1601, Japan
3.3.6 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง	Denver, USA
3.3.7 เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง	Pioneer, USA
3.3.8 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย	Fibertec™1020, Germany
3.3.9 เครื่องวัดสี	Minolta Chroma-meter CR-400 Konica, Japan
3.3.10 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)	Stable Mitro Systems TA Xt plus, England

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 วิธีผลิตแป้งจากถั่วแดง

การเตรียมแป้งจากถั่วแดง โดยนำถั่วแดงหลวงพันธุ์หมากจ๋าม และถั่วนิ้วนางแดง มาคัดเลือกเมล็ดเสียออก ผลิตแป้งถั่วแดง ตามวิธีการของ Siddiq และคณะ (2010) แสดงดังภาพที่ 3.1 โดยนำถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องในอัตราส่วนถั่วแดงต่อน้ำเท่ากับ 1:4 กรัมต่อปริมาตร ในกรณีของแป้งถั่วแดงที่เตรียมจากถั่วแดงทั้งเมล็ด จะนำถั่วแดงที่แช่น้ำจนอิ่มตัวไปอบแห้ง แต่ในกรณีของแป้งถั่วแดงที่เตรียมจากถั่วแดงลอกเปลือกออก จะลอกเปลือกของถั่วแดงที่อิ่มตัวด้วยน้ำก่อนนำไปอบแห้ง โดยทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนถั่วแดงมีความชื้นประมาณ 6-8 เปอร์เซ็นต์ (wet basis) จากนั้นนำไปบดหยาบด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิล (hammer mill) แล้วจึงนำแป้งถั่วแดงที่ผ่านการบดหยาบไปบดละเอียดด้วยเครื่องบด pin mill ซึ่งใช้ตะแกรงบดแยกที่มีรูขนาด 0.25 มิลลิเมตร นำไปบรรจุในถุงพลาสติกแบบสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3.1 แป้งที่ผลิตจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกกับไม่ลอกเปลือก รวมทั้งแป้งที่มีขายทางการค้าคือ แป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเคมีกายภาพ ตามข้อที่ 3.4.2.1-3.4.2.3



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการผลิตแป้งถั่วแดง

ที่มา : Siddiq และคณะ (2010)

3.4.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งถั่วแดงที่ผลิตจากถั่วแดงทั้งเมล็ดและถั่วแดงลอกเปลือกออก

3.4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง โดยวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า และเยื่อใย (AOAC, 2000) วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส (Juliano และคณะ, 1981) และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล (Neilson, 1998)

3.4.2.2 การวิเคราะห์ค่าสีของแป้ง

การวัดสีของแป้งจากถั่วแดง โดยใช้เครื่องวัดสี (Minolta Chroma-meter CR-400 Konica, ประเทศญี่ปุ่น) และบันทึกค่าสีในระบบของ Hunter โดยวัดอยู่ในรูปของค่า L* (ค่าความสว่าง) ค่า a* (ค่าสีแดง) และค่า b* (ค่าสีเหลือง)

3.4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง

1) ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity)

นำแป้งมาผสมกับน้ำ โดยผสมแป้ง 1 กรัมในน้ำ 10 มิลลิลิตร ในหลอดหมุนเหวี่ยง นาน 5 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักของของสารละลายส่วนใส เพื่อคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับน้ำในหน่วยกรัมของน้ำที่ถูกดูดซับต่อกรัมของแป้ง (Adebowale และ Lawal, 2004)

2) กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility)

เตรียมสารแขวนลอยจากแป้งให้มีความเข้มข้น 0.7 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักแห้ง) นำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 , 70 , 80 และ 90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที คนตลอดเวลา นำออกมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นดูดสารละลายส่วนใสใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนัก และนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาน้ำหนักส่วนของแป้งที่ละลายน้ำได้ (สมการที่ 3.1) ส่วนแป้งเปียกในหลอดให้นำมาชั่งน้ำหนัก ได้เป็นน้ำหนักของแป้งส่วนที่พองตัวได้ จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาค่ากำลังการพองตัวของแป้ง ดังสมการที่ 3.2 โดยดัดแปลงจากวิธีของ Doublier (1981)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \times 100 \qquad (3.1)$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของแป้งที่พองตัว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \qquad (3.2)$$

3) การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง (Gelatinization)

โดยนำตัวอย่างแป้งถั่วแดงมาเตรียมเป็นสารแขวนลอยในอัตราส่วน 1:4 แล้วนำตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ช่วงอุณหภูมิ 10-95 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_0) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) ของการเกิดเจลาติไนเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization, ΔH)

4) สมบัติทางความหนืดของแป้ง (Pasting properties)

ศึกษาสมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง brabender viscoamylograph โดยเตรียมสารแขวนลอยของแป้ง ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักแห้ง) ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาให้ความร้อนของเครื่อง brabender viscoamylograph ดังนี้ เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยอุณหภูมิคงที่นาน 15 นาที แล้วจึงค่อยๆลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และคงที่ไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 30 นาที บันทึกอุณหภูมิที่ความหนืดของแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง (pasting temperature) และบันทึกความหนืดของแป้งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

5) ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง และการละลาย (Freeze-thaw stability)

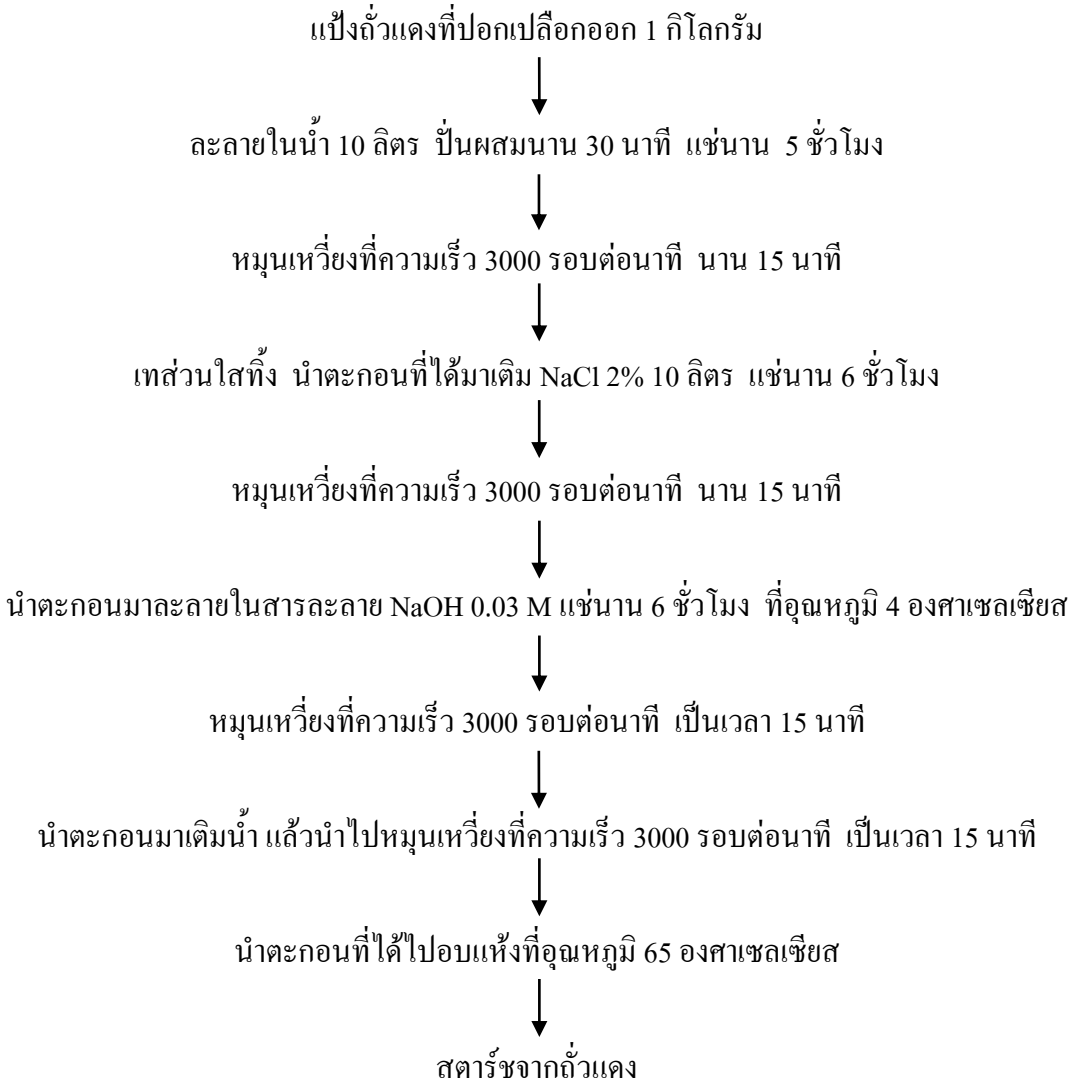
ศึกษาความสามารถในการคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง และการละลายของแป้งถั่วแดง โดยเตรียมสารแขวนลอยที่ระดับความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักแห้ง) นำไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง brabender viscoamylograph โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 15 นาที ชั่งน้ำหนักของแป้งเปียกแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการแช่เยือกแข็งและละลายซ้ำจำนวน 5 รอบ จากนั้นนำเจลไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำจากเจล (% syneresis) โดยใช้สมการที่ 3.3 (Hoover และ Ratnayake, 2002)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่แยกออกจากเจล}}{\text{น้ำหนักเจลเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (3.3)$$

3.4.3 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช

ทดลองเตรียมสตาร์ชจากถั่วแดง โดยการนำถั่วแดงมาแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปลอกเปลือก นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดหยาบด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิล (hammer mill) และบดละเอียดด้วยเครื่องบด pin mill ซึ่งใช้ตะแกรงบดแยกที่มีรูขนาด 0.25 มิลลิเมตร นำแป้งที่ได้ 1 กิโลกรัมมาละลายในน้ำ 10 ลิตร ปั่นผสมนาน 30 นาที แช่นาน

5 ชั่วโมง นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนที่ใสทิ้ง นำตะกอนที่ได้มาเติม NaCl ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ 10 ลิตร แช่นาน 6 ชั่วโมง นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำตะกอนมาละลายในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.03 โมล แช่นาน 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงนำตะกอนมาเติมน้ำ แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3.2 (ดัดแปลงจาก Adebowale และคณะ, 2002)



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตสตาร์ชจากถั่วแดง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Adebowale และคณะ (2002)

ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของสตาร์ชถั่วแดง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตรวจสอบชนิด และปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

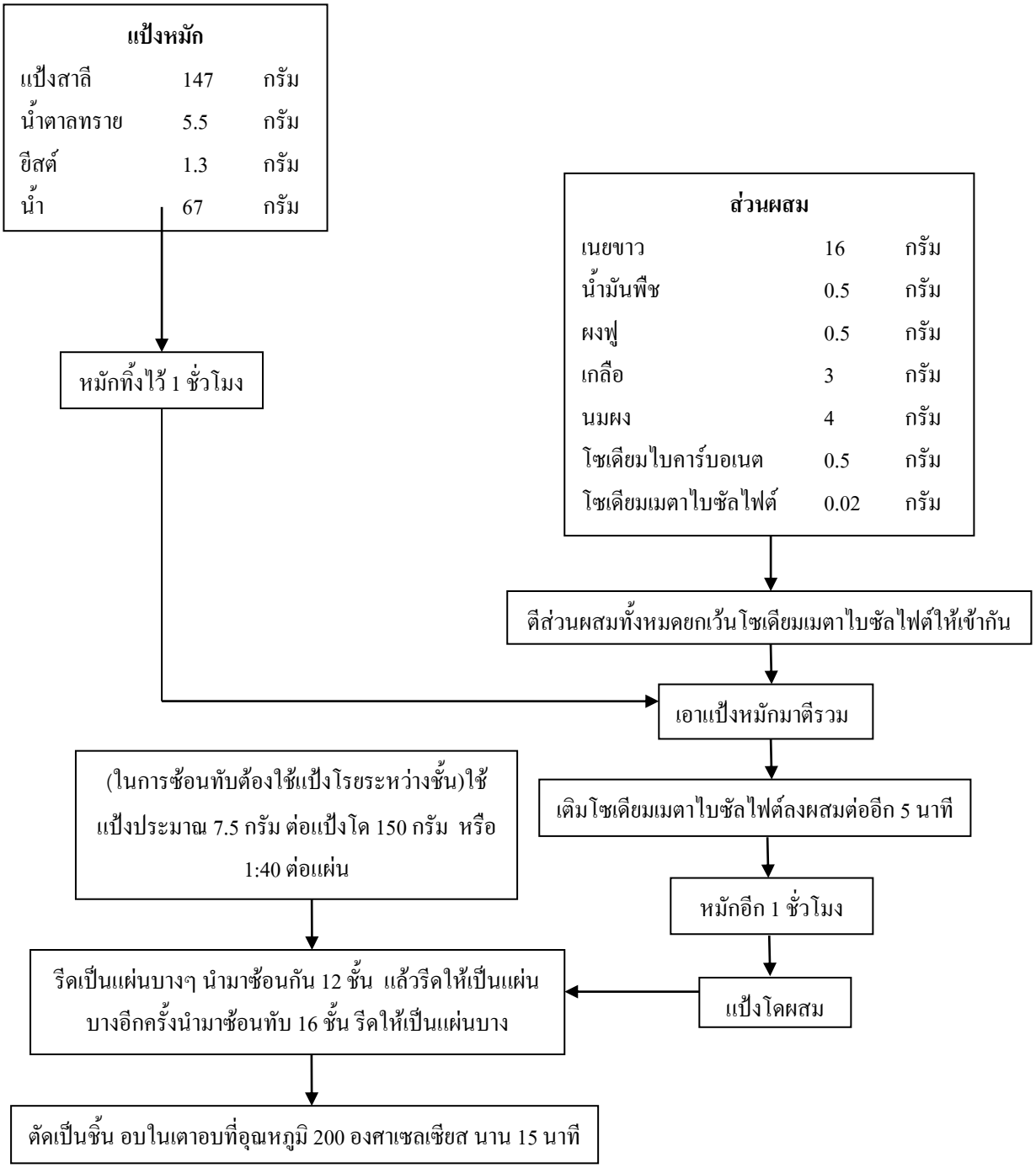
3.4.4 การศึกษาปริมาณแป้งถั่วแดงที่เหมาะสมในการผลิตแครกเกอร์

ศึกษาการผลิตแครกเกอร์ โดยใช้กระบวนการผลิตแครกเกอร์ที่ใช้ดัดแปลงจากวิธีการผลิตแครกเกอร์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด สินสาลี สแน็ค แอนด์ บิสกิต ดังสูตรในตารางที่ 3.1 ทำการผลิตแครกเกอร์ตามวิธีการดังภาพที่ 3.3 ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของแป้งถั่วแดงที่ผลิตจากถั่วแดงทั้งเมล็ดและถั่วแดงลอกเปลือกออก นำมาทดแทนแป้งสาลีในส่วนของแป้งหมัก โดยทดลองทดแทนแป้งสาลี ในกรณีของแป้งที่เตรียมจากถั่วแดงทั้งเมล็ดทดแทนในปริมาณ 20 , 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้งสาลี และในกรณีของแป้งที่เตรียมจากถั่วแดงลอกเปลือกออกทดแทนในปริมาณ 20 , 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้งสาลี และปรับปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้ปริมาณน้ำสุดท้ายเท่ากับสูตรมาตรฐาน ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส เพื่อหาปริมาณแป้งถั่วแดงที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 สูตรมาตรฐานแครกเกอร์

แป้ง	ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)
แป้งหมัก	แป้งสาลี	147
	น้ำตาลทราย	5.5
	ยีสต์	1.3
	น้ำ	67
ส่วนผสม	เนยขาว	16
	น้ำมันพืช	0.5
	ผงฟู	0.5
	เกลือ	3
	นมผง	4
	โซเดียมไบคาร์บอเนต	0.5
	โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	0.02

ที่มา : ดัดแปลงจากห้างหุ้นส่วนจำกัด สินสาลี สแน็ค แอนด์ บิสกิต



หมายเหตุ : แป้งโรยระหว่างชั้น ประกอบด้วย แป้งข้าวโพด 25 กรัม แป้งมัน 27 กรัม เนยขาว 9 กรัม เกลือ 1 กรัม

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการผลิตแครกเกอร์

ที่มา : ดัดแปลงจากห้างหุ้นส่วนจำกัด สินสาลี สแน็ค แอนด์ บิสกิต

3.4.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแครกเกอร์

1) การวัดเปอร์เซ็นต์ขึ้นฟูของแครกเกอร์ด้วยเวอร์เนียร์ แคลลิปเปอร์ (Vernierslide calipers)

2) การวัดเนื้อสัมผัสของแครกเกอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (TA.XT2 Texture Analyser)

3) การวัดสีของแครกเกอร์ด้วยเครื่องวัดสี (Minolta Chroma-meter CR-400 Konica, ประเทศญี่ปุ่น)

3.4.6 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของแครกเกอร์

ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง เปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐานที่ไม่มีการผสมแป้งถั่วแดง ทดสอบด้วยผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน โดยผู้ทดสอบที่ใช้ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน คุณลักษณะที่ทดสอบคือ สี กลิ่น การเรียงตัวเป็นชั้นของแป้ง เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 7 points Hedonic scale เพื่อเลือกสูตรการผลิตแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงที่ดีที่สุด และเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบชิม

3.4.7 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์ที่ผลิตจากแป้งถั่วแดง โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า และเยื่อใย (AOAC, 2000) เปรียบเทียบกับสูตรมาตรฐาน

3.5 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Analysis of variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของสถิติโดยใช้ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นการทดสอบทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD)

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลผลิตของแป้งที่เตรียมจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดง

การผลิตแป้งจากถั่วแดงทั้งเมล็ด โดยการนำถั่วแดงหลวง (ถั่วแดงเมล็ดใหญ่) และถั่วนิ้วนางแดง (ถั่วแดงเมล็ดเล็ก) มาแช่น้ำ แล้วนำไปอบแห้ง และบดให้ละเอียดโดยใช้ตะแกรงบดแยกที่มีรูขนาด 0.25 มิลลิเมตร พบว่าแป้งถั่วแดงที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวนวล และมีผงสีแดงของเปลือกถั่วแดงกระจายทั่วแป้ง และมีกลิ่นของถั่วแดงเล็กน้อย (ภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.2) จากกระบวนการสามารถผลิตแป้งได้ 89.11 กรัมจากถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 100 กรัม และผลิตแป้งได้ 87.90 กรัมจากถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด 100 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

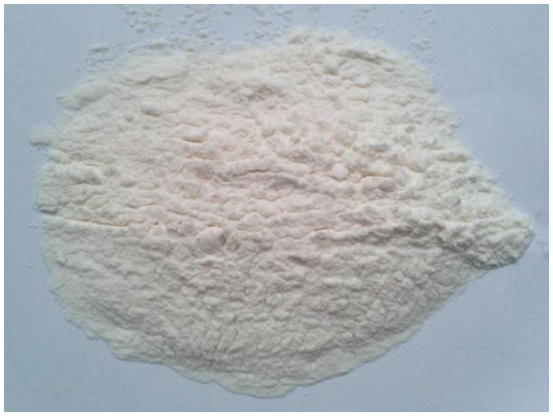
ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตแป้งถั่วแดงทั้งเมล็ด

วัตถุดิบ	น้ำหนัก (กรัม)
ถั่วแดงหลวง	100.00±0.04
ถั่วแดงหลวงหลังแช่น้ำ	213.14±2.35
ถั่วแดงหลวงหลังอบแห้ง	91.06±1.23
ถั่วแดงหลวงหลังบดหยาบ	90.00±0.98
แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดหลังบดละเอียด	89.11±0.87
ถั่วนิ้วนางแดง	100.00±0.02
ถั่วนิ้วนางแดงหลังแช่น้ำ	200.41±2.12
ถั่วนิ้วนางแดงหลังอบแห้ง	89.60±1.56
ถั่วนิ้วนางแดงหลังบดหยาบ	88.86±1.26
แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดหลังบดละเอียด	87.90±0.89

ภาพที่ 4.1 แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด

ภาพที่ 4.2 แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด

ในกรณีการผลิตแป้งถั่วแดงจากถั่วแดงลอกเปลือกออก จะลอกเปลือกของถั่วแดงที่อิ่มตัวด้วยน้ำก่อนนำไปอบแห้ง และบดให้ละเอียด พบว่าแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออกที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีขาวนวลและมีกลิ่นของถั่วแดงมากกว่าแป้งถั่วแดงที่เตรียมจากถั่วแดงทั้งเมล็ด (ภาพที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.4) จากกระบวนการสามารถผลิตแป้งถั่วแดงหลวงได้ 77.01 กรัม จากถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 100 กรัม และผลิตแป้งได้ 67.04 กรัม จากถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดลอกเปลือกออก 100 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.3 แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก

ภาพที่ 4.4 แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออก

วัตถุดิบ	น้ำหนัก (กรัม)
ถั่วแดงหลวง	100.00±0.05
ถั่วแดงหลวงหลังแช่น้ำ	218.11±2.45
ถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก	184.63±3.66
ถั่วแดงหลวงหลังอบแห้ง	81.14±1.01
ถั่วแดงหลวงหลังบดหยาบ	78.53±0.88
แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกหลังบดละเอียด	77.01±0.95
ถั่วนิ้วนางแดง	100.00±0.02
ถั่วนิ้วนางแดงหลังแช่น้ำ	202.52±2.10
ถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก	171.74±2.13
ถั่วนิ้วนางแดงหลังอบแห้ง	69.77±1.24
ถั่วนิ้วนางแดงหลังบดหยาบ	68.42±0.75
ถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกหลังบดละเอียด	67.04±0.82

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วแดง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วแดงที่เตรียมจากถั่วทั้งเมล็ด (ตารางที่ 4.3) พบว่าแป้งจากถั่วแดงหลวง 100 กรัม มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เท่ากับ 66.53 , 21.97 , 1.60 , 5.03 และ 4.87 กรัม ตามลำดับ แป้งจากถั่วนิ้วนางแดง 100 กรัม มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เท่ากับ 63.85, 24.34 , 0.48 , 4.88 และ 6.45 กรัม ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออก พบว่าแป้งจากถั่วแดงหลวง 100 กรัม มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เท่ากับ 69.23 , 24.03 , 2.21 , 2.75 และ 1.78 กรัม ตามลำดับ แป้งจากถั่วนิ้วนางแดง 100 กรัม มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย เท่ากับ 66.74 , 27.29 , 1.28 , 3.19 และ 1.50 กรัม ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Siddiq และคณะ (2010) กล่าวคือถั่วแดงจัดอยู่ในกลุ่มของถั่วที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก มีโปรตีนสูง และมีไขมันต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดง พบว่าแป้งถั่วนิ้วนางแดงมีปริมาณโปรตีนมากกว่าแป้งถั่วแดงหลวง และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าแป้งถั่วแดงหลวงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของถั่วแดงทั้งสองสายพันธุ์ เนื่องจากความแตกต่างของสายพันธุ์ถั่ว พื้นที่เพาะปลูก และสภาพแวดล้อม นอกจากนี้แป้งที่เตรียมจากถั่วแดงทั้งเมล็ด จะมีปริมาณเยื่อใยและปริมาณเถ้าซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเกลือแร่มากกว่าแป้งที่เตรียมจากถั่วแดงลอกเปลือกออกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเฉพาะปริมาณของเยื่อใยของแป้งถั่วนิ้วนางแดงเพิ่มขึ้นจาก 1.50 เป็น 6.45 กรัมต่อแป้ง 100 กรัม เมื่อแป้งมีส่วนของเปลือกผสมอยู่ ทั้งนี้อาจเนื่องจากถั่วนิ้วนางแดงเป็นถั่วแดงเมล็ดเล็กทำให้มีปริมาณของเปลือกเมื่อเทียบต่อน้ำหนักสูงกว่าถั่วแดงหลวงที่เป็นถั่วแดงเมล็ดใหญ่

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของถั่วแดงทั้งสองสายพันธุ์ กับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีที่ผลิตทางการค้า ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าแป้งถั่วเหลืองเป็นแป้งที่มีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงแต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำ ในขณะที่แป้งสาลีมีลักษณะเดียวกับแป้งถั่วแดงคือมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนสูง แต่มีปริมาณไขมันต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งถั่วแดงที่ผลิตได้จากการทดลองนี้กับแป้งสาลีทางการค้า พบว่าแป้งถั่วแดงมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าแป้งสาลีประมาณ 18-23 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปริมาณโปรตีนมากกว่าแป้งสาลีประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสในแป้งถั่วแดงทั้งสองสายพันธุ์ รวมทั้งแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีทางการค้า แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณอะไมโลสจะแตกต่างตามชนิดและพันธุ์ของพืช (Vargas และคณะ, 2004) โดยแป้งจากถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด แป้งจากถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด แป้งจากถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก และแป้งจากถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออกมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 13-17 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลี อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ตรวจไม่พบปริมาณอะไมโลสในแป้งถั่วเหลือง

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) หรือน้ำตาลที่มีกลุ่มอัลดีไฮด์หรือคีโตนที่เป็นอิสระ ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วยตัวออกซิไดส์อย่างอ่อน ตัวอย่างของน้ำตาลพวกนี้ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทุกชนิด เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลกาแลคโตสและน้ำตาลฟรุกโตส พบว่าแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด และแป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 1.54 , 2.76 , 2.43 และ 3.12 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลี พบว่าแป้งถั่วแดงมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่าแป้งสาลี และมีปริมาณน้อยกว่าแป้งถั่วเขียว ซึ่งสุนีย์ และคณะ (2543) รายงานว่าแป้งถั่วเขียวมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 4.65 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม น้ำตาลรีดิวซ์ในที่พบในแป้งถั่วแดง ส่งผลให้แป้งถั่วแดงเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (mailard reaction) ระหว่างกรดอะ-มิโนกับน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งทำให้สีและกลิ่นของแป้งถั่วแดงเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้น (กล้า-ฉรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี (กรัมต่อ 100 กรัม, น้ำหนักแห้ง)

ค่าที่วิเคราะห์ (ก./100 ก.)	แป้งถั่วแดงหลวง		แป้งถั่วนิ้วนางแดง		แป้งถั่วเหลือง	แป้งสาลี
	ทั้งเมล็ด	ลอกเปลือก	ทั้งเมล็ด	ลอกเปลือก		
คาร์โบไฮเดรต	66.53±0.21 [c]	69.23±0.21 [d]	63.85±0.46[b]	66.74±1.13[b]	26.06±0.86 [a]	85.09±0.97 [e]
โปรตีน	21.97±0.22 [b]	24.03±0.05 [c]	24.34±0.02 [c]	27.29±0.02 [d]	43.78±0.69 [f]	12.88±0.63 [a]
ไขมัน	1.60±0.02 [d]	2.21±0.19 [e]	0.48±0.02 [a]	1.28±0.05 [c]	21.38±0.21 [f]	0.83±0.04 [b]
เถ้า	5.03±0.05 [e]	2.75±0.07 [b]	4.88±0.04 [d]	3.19±0.07 [c]	5.75±0.23 [f]	0.91±0.10 [a]
เยื่อใย	4.87±0.04[d]	1.78±0.13 [b]	6.45±0.53 [e]	1.50±0.12[b]	3.03±0.22 [c]	0.29±0.14 [a]
อะไมโลส	13.56[a]	14.92[b]	14.84[b]	16.42[c]	ND	25.47 [d]
น้ำตาลรีดิวซ์ (มก./100 ก.)	1.54[a]	2.76 [b]	2.43[b]	3.12 [c]	ND	34.57 [d]

หมายเหตุ : 1. ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวนอนแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

2. ND หมายถึง not detected (ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้)

4.3 ค่าสีของแป้งถั่วแดง

ผลการศึกษาพบว่าค่าสีของแป้งจากถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งจากถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าแป้งจากถั่วแดงทั้งเมล็ดที่ผลิตได้มีสีขาวนวล และผงสีแดงของเปลือกถั่วแดงผสมกัน ในขณะที่แป้งจากถั่วแดงลอกเปลือกออกมีสีขาวนวลกว่าแป้งจากถั่วแดงทั้งเมล็ด เมื่อนำมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Minolta รุ่น CR-400 พบว่าค่าความสว่าง (L*) ของแป้งจากถั่วแดงทั้งเมล็ดทั้งสองสายพันธุ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) รวมทั้งแป้งจากถั่วแดงลอกเปลือกออกทั้งสองสายพันธุ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แป้งถั่วแดงที่เตรียมจากถั่วทั้งเมล็ดมีเปลือกผสมอยู่จะทำให้ค่าสีแดง (a*) ที่อ่านได้จากเครื่องวัดสีมีค่าสูง แต่การลอกเปลือกออกจะทำให้ค่าสีเหลือง (b*) ของแป้งถั่วแดงทั้งสองสายพันธุ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีทางการค้า พบว่าแป้งสาลีมีค่าความสว่างมากกว่าแป้งชนิดอื่น ในขณะที่แป้งถั่วเหลืองมีค่าสีเหลือง (b*) มากกว่าแป้งชนิดอื่น

ตารางที่ 4.4 ค่าสีของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

ชนิดแป้ง	ค่าสี		
	L*	a*	b*
แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด	85.86±0.13^{ab}	6.26±0.15^{d}	2.74±0.11^{b}
แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือก	86.62±0.15^{bc}	4.51±0.11^{b}	5.19±0.13^{d}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด	85.41±0.11^{a}	4.91±0.13^{c}	3.28±0.08^{c}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือก	86.68±0.09^{c}	4.61±0.08^{b}	6.42±0.10^{e}
แป้งถั่วเหลือง	89.66±0.13^{d}	3.24±0.07^{a}	16.37±0.18^{f}
แป้งสาลี	96.64±0.10^{e}	4.56±0.09^{b}	0.59±0.09^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งถั่วแดง

4.4.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity)

ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น ความชุ่มชื้นของผลิตภัณฑ์ การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้ง รวมทั้งการเกิดการสเตลิ่ง (staling) ของผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) การที่แป้งแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับน้ำแตกต่างกันนั้น เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างโปรตีน (protein structure) และความแตกต่างของสายโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตที่ชอบน้ำ (hydrophilic carbohydrate) (Padilla และคณะ, 1996) โดยพบว่าแป้งถั่วเหลืองทางการค้ามีความสามารถในการดูดซับน้ำเท่ากับ 2.77 กรัมต่อกรัมของแป้ง (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น ในขณะที่แป้งสาลีมีค่าความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยที่สุด ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งถั่วแดงในการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Siddiq และคณะ (2010) ที่รายงานว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งถั่วในตระกูล *Phasecolus vulgaris* L. มีค่าอยู่ระหว่าง 2.23-2.62 กรัมต่อกรัมของแป้ง (น้ำหนักแห้ง) ปริมาณโปรตีนในแป้งดูเหมือนว่าจะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้ง อาจเป็นไปได้ว่าโครงสร้างของโปรตีนในแป้งถั่วมีส่วนที่ชอบน้ำจึงทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ได้ (Adebowale และ Lawal, 2004)

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

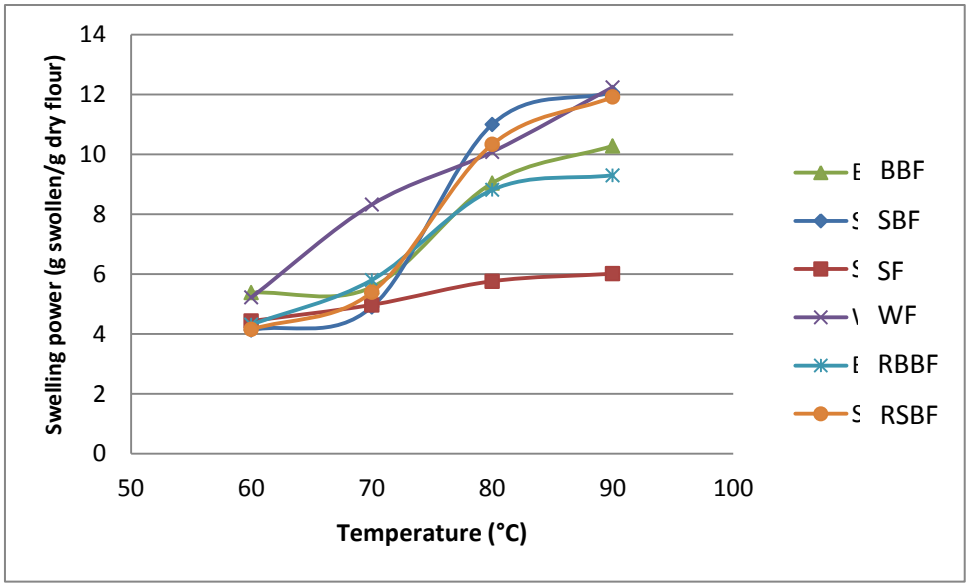
ชนิดแป้ง	กรัมต่อกรัมของแป้ง (น้ำหนักแห้ง)
แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด	2.23 ± 0.02^{c}
แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือก	2.40 ± 0.03^{e}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด	2.12 ± 0.02^{b}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือก	2.31 ± 0.01^{d}
แป้งถั่วเหลือง	2.77 ± 0.02^{f}
แป้งสาลี	1.41 ± 0.02^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

4.4.2 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility)

การศึกษากำลังการพองตัวของแป้งถั่วแดงตัวอย่าง รวมทั้งแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีทางการค้า โดยทำการกวนผสมที่อุณหภูมิ 60 , 70 , 80 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองของรูปแบบกำลังการพองตัวของแป้งแสดงดังภาพที่ 4.5 โดยปกติแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะดูดซับน้ำไว้เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่วนของอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดแป้งจะจับกับน้ำได้มากขึ้น รวมทั้งการจับกันของโมเลกุลในส่วนผลึก (crystallite structure) เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจะจับกับน้ำได้มากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งพองตัวมากขึ้น การที่เป็นเช่นนี้เกิดจากความร้อนทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อโมเลกุลถูกทำลาย ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ที่สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) ผลการทดลองพบว่ารูปแบบกำลังการพองตัวของแป้งถั่วแดงเป็นแบบ 2 ขั้น (two stage swelling pattern) ซึ่งเป็นรูปแบบกำลังการพองตัวของแป้งที่พบทั่วไป ผลการทดลองสอดคล้องนี้กับงานวิจัยของ Sirivongpaisal (2008) และ Oates (1997) โดยมีลักษณะแตกต่างจากแป้งสาลี ที่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 60 องศาเซลเซียส กำลังการพองตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การที่กำลังการพองตัวของแป้งถั่วแดงเป็นแบบ 2 ขั้น อาจเกิดจากพันธะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้งมีการจับกันแข็งแรง มีจำนวนพันธะสูงเป็นผลทำให้โครงร่างแหของเม็ดแป้งแข็งแรง จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำให้เม็ดแป้งพองตัว (Shimelis และคณะ, 2007) หรืออาจเกิดจากไขมันและโปรตีนจับหรือสร้างพันธะร่วมกับอะไมโลส ทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นขึ้น (complex) เป็นผลให้การพองตัวเกิดได้ยากขึ้น (Pomeranz, 1991) ดังจะเห็น

ได้จากค่ากำลังการพองตัวของแป้งถั่วเหลืองมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่ประกอบด้วยโปรตีนและไขมันมากที่สุด



หมายเหตุ : BBF = แป้งถั่วแดงหลวง , RBBF = แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก , SBF = แป้งถั่วนิ้วนางแดง RSBF = แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก , SF = แป้งถั่วเหลือง , และ WF = แป้งสาลี

ภาพที่ 4.5 รูปแบบกำลังการพองตัวของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก และแป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่างๆ

กำลังการพองตัวของแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังการพองตัวของแป้งชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่ากำลังการพองตัวของแป้งจากถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก และแป้งสาลีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีกำลังการพองตัวเท่ากับ 12.07 , 11.91 และ 12.24 กรัมต่อกรัมของแป้ง ตามลำดับ รองลงมาคือแป้งจากถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก ในขณะที่แป้งถั่วเหลืองมีกำลังการพองตัวน้อยที่สุดคือ 6.00 กรัมต่อกรัมของแป้ง

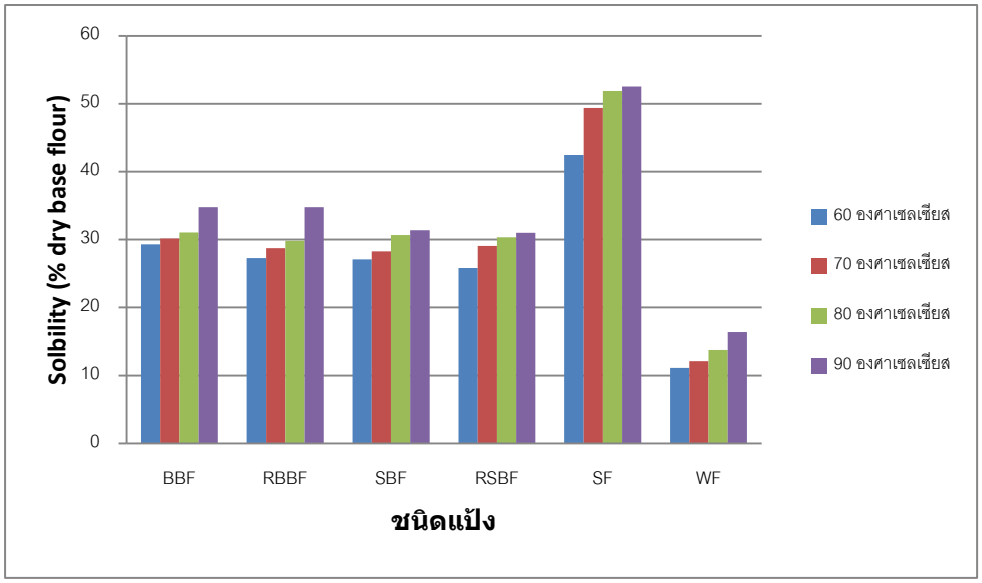
ตารางที่ 4.6 กำลังการพองตัวของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ชนิดแป้ง	กำลังการพองตัว (กรัมต่อกรัมของแป้ง)
แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด	10.28 ± 0.26^{b}
แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือก	9.30 ± 0.21^{b}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด	12.07 ± 0.18^{c}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือก	11.91 ± 0.24^{c}
แป้งถั่วเหลือง	6.01 ± 0.35^{a}
แป้งสาลี	12.24 ± 0.15^{c}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

เปอร์เซ็นต์การละลายของแป้ง คำนวณจากปริมาณของแป้งที่ละลายได้เมื่อนำน้ำแป้งไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 , 70 , 80 และ 90 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.6 โดยแป้งจากถั่วแดงหลวงมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 27-35 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง (น้ำหนักแห้ง) และแป้งจากถั่วนิ้วนางแดงมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 25-32 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง (น้ำหนักแห้ง) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shimelis และคณะ (2007) ที่รายงานค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของแป้งจากถั่ว Haricot ซึ่งเป็นแป้งในตระกูล *Phasecolus vulgaris* L. เช่นเดียวกับถั่วแดง โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 33-37 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง และมีค่ากำลังการพองตัวอยู่ระหว่าง 9.17-11.27 กรัมต่อกรัมของแป้ง เมื่ออุณหภูมิของสารละลายแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ (gelatinize) พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เป็นผลให้โครงสร้างของผลึกคลายตัว รวมทั้งโมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ทำให้แป้งละลายได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของแป้งสาลีทางการค้ามีค่าน้อยกว่าแป้งจากถั่วแดงและแป้งถั่วเหลือง โดยแป้งสาลีมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายที่อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส อยู่ระหว่าง 13-16 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง (น้ำหนักแห้ง) ชุติมา และคณะ (2554) ได้รายงานว่าแป้งสาลีที่ใช้ทำขนมเค้กมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายที่ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 8.77 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง (น้ำหนักแห้ง) การที่แป้งจากพืชตระกูลถั่วโดยเฉพาะถั่วเหลืองมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายที่สูง อาจเป็นผลจากโปรตีนในพืชตระกูลถั่วประกอบด้วย

หมู่ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ที่ชอบน้ำ จึงทำให้แป้งถั่วแดงและแป้งถั่วเหลืองมีความสามารถในการละลายมากขึ้น



หมายเหตุ : BBF = แป้งถั่วแดงหลวง , RBBF = แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก , SBF = แป้งถั่วนิ้วนางแดง RSBF = แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก , SF = แป้งถั่วเหลือง , และ WF = แป้งสาลี

ภาพที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่างๆ

4.4.3 การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งถั่วแดง (Gelatinization)

การศึกษาสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจากถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งจากถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก ด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งเครื่อง DSC เป็นเครื่องที่ใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติแล้วโพลิเมอร์ต่างๆในรูปผลึกและอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160-200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น อุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แป้งจะเกิดเจลาติไนเซชัน โดยทั่วไปจะถือว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสูงสุด (peak temperature) คืออุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน สำหรับการตรวจสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแป้งกับน้ำในอัตรา 30:70

จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลาติไนเซชัน จะได้ thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH,cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้ง (Swinkels, 1985b)

ตารางที่ 4.7 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

ชนิดแป้ง	T_0(°C)	T_p(°C)	T_c(°C)	ΔH (J/g)
แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด	67.7±0.1^{a}	76.0±0.1^{a}	82.3±0.1^{a}	2.68±0.09^{b}
แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือก	66.7±0.1^{a}	75.2±0.1^{a}	82.0±0.1^{a}	3.52±0.14^{d}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด	66.7±0.1^{a}	74.2±0.1^{a}	79.5±0.1^{a}	3.27±0.12^{c}
แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือก	66.2±0.1^{a}	75.1±0.1^{a}	80.4±0.1^{a}	3.03±0.16^{c}
แป้งถั่วเหลือง	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : 1. ND หมายถึง not detected (ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้)

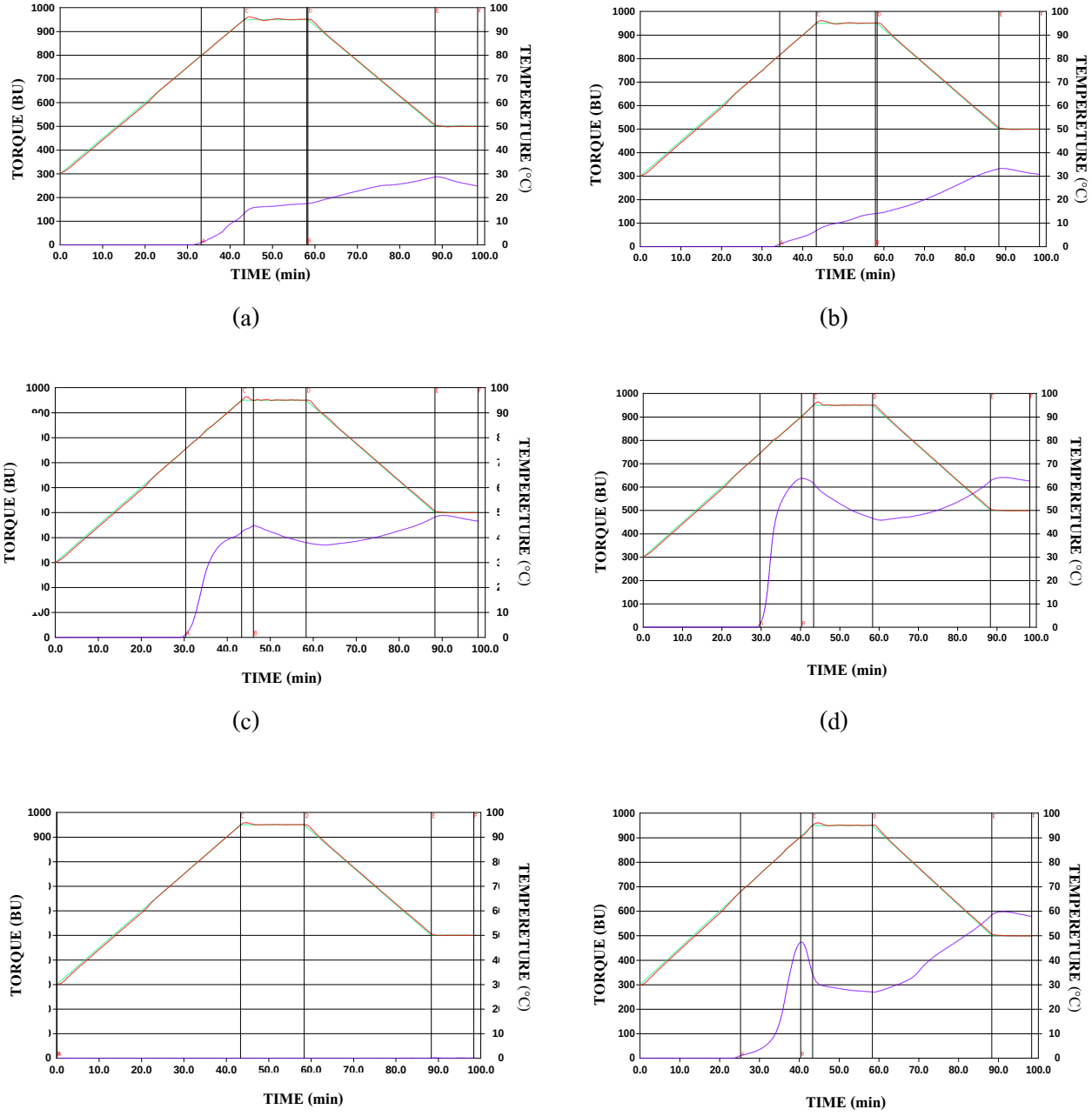
2. ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งถั่วแดงตัวอย่างที่อ่านจากกราฟในดังตารางที่ 4.7 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาติไนซ์ (T_0) อยู่ระหว่าง 66.2-67.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อยู่ระหว่าง 75.1-76.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสิ้นสุดของเกิดเจลาติไนเซชัน (T_c) อยู่ระหว่าง 82.0-82.3 องศาเซลเซียส ขณะที่ค่าพลังงานเอนทาลปีหรือพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเพื่อใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ (ΔH) อยู่ระหว่าง 2.68-3.52 จูลต่อกรัมแห้งของแป้ง และเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานเอนทาลปีในกลุ่มของแป้งถั่วแดงตัวอย่างอื่น พบว่าแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกต้องใช้ค่าเอนทาลปีมากที่สุด

King (2005) รายงานว่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งสาลีเท่ากับ 58.3 และ 63.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์เท่ากับ 1.67 จูลต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งถั่วแดงตัวอย่างในการทดลองนี้พบว่าอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์สูงกว่าของแป้งสาลีที่รายงานโดย King (2005) มาก แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของแป้งถั่วแดงมีความแข็งแรงมากกว่าแป้งสาลี (Singh และคณะ 2003 ; Sirivongpaisal, 2008)

4.4.4 สมบัติทางความหนืดของแป้งถั่วแดง (pasting properties)

จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก โดยเปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลือง และแป้งสาลี ด้วยเครื่อง brabender viscoamylograph โดยเตรียมสารแขวนลอยของแป้ง ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักแห้ง) พบว่าแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด และแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก (ภาพที่ 4.7) มีรูปแบบความหนืดแบบ c คือกราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวน้อย (restricted-swelling starches) ลักษณะของกราฟไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นระหว่างการต้ม ซึ่งแตกต่างกับแป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออกและแป้งสาลีที่มีรูปแบบความหนืดคล้ายกันคือแบบ b เป็นกราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง (moderate-swelling starches) (กล้าณรงค์และ เกื้อกูล , 2546) และพบว่าแป้งถั่วเหลือง เมื่อตรวจวิเคราะห์แล้วไม่พบความเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างที่มีการให้ความร้อนด้วยเครื่อง เครื่อง brabender viscoamylograph ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องนี้กับปริมาณอะไมโลส โดยเป็นไปได้ว่าแป้งถั่วเหลืองมีปริมาณอะไมโลสน้อยมากจนไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ ค่าต่างๆที่ได้จากการเครื่อง brabender viscoamylograph แสดงดังตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.7 ลักษณะกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด (a) , แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก (b) , แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด (c) , แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก (d) แป้งถั่วเหลือง (e) และแป้งสาลี (f)

ตารางที่ 4.8 ค่าต่างๆที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง brabender viscoamylograph ของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

Parameters	แป้งถั่วแดงหลวง		แป้งถั่วนิ้วนางแดง		แป้งถั่วเหลือง	แป้งสาลี
	ทั้งเมล็ด	ลอกเปลือก	ทั้งเมล็ด	ลอกเปลือก		
Pasting tempareture (C°)	76.9	77.9	74.5	74.5	ND	68.1
Viscosity (B.U.)						
Peak	180	138	462	584	ND	474
Final 95 C°	180	138	379	453	ND	271
50 C°	180	138	379	453	ND	271
Final 50 C°	293	343	493	615	ND	584
Breakdown	0	0	83	131	ND	203
Setback	113	204	114	162	ND	313

หมายเหตุ : ND หมายถึง not detected

4.4.5 ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง และการละลาย (Freeze-thaw stability)

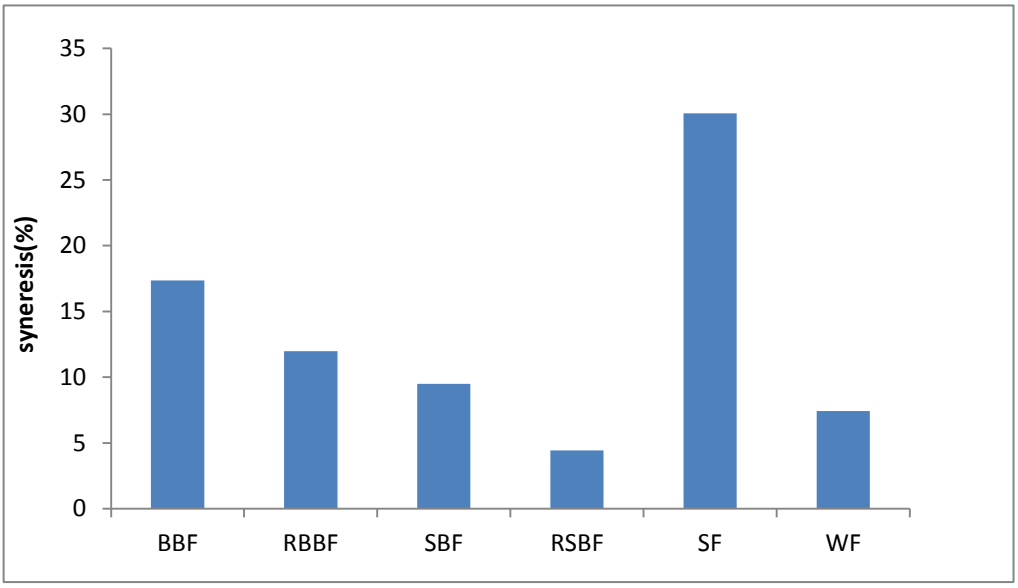
เมื่อนำสารละลายแป้งตัวอย่างต่างๆมาทำการแช่เยือกแข็งและละลาย จนครบ 5 รอบ พบว่าแป้งแต่ละชนิดมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลาย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 พบว่าเจลของแป้งถั่วแดงหลวงมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำน้อยกว่าเจลของแป้งถั่วแดงหลวง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับสมบัติทางความหนืด ดังแสดงในภาพที่ 4.7 การที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปริมาณของอะไมโลสในแป้งถั่วแดงหลวงมีน้อยกว่าแป้งถั่วนิ้วนางแดง แป้งถั่วแดงหลวงจึงมีความแข็งแรงของเจลน้อยกว่าแป้งถั่วนิ้วนางแดง เมื่อพิจารณาถึงการลอกเปลือกถั่วแดงออก พบว่าเจลของแป้งถั่วแดงทั้งเมล็ดมีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำมากกว่าเจลของแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออก การที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากแป้งถั่วแดงทั้งเมล็ดมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออก จึงทำให้เจลของแป้งถั่วแดงทั้งเมล็ดมีความแข็งแรงมีน้อยกว่าเจลของแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลืองมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งตัวอย่างอื่นๆที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางความหนืด ดังแสดงในภาพที่ 4.7 การที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาก

จากแป้งถั่วเหลืองมีปริมาณอะไมโลสน้อย จึงทำให้แป้งถั่วเหลืองมีความสามารถในการเกิดเจลน้อยด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.9 การเกิดการแยกน้ำ (syneresis) ของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก เปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

ชนิดแป้ง	เปอร์เซ็นต์การแยกน้ำ
แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด	17.36±0.13 [d]
แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือก	11.97±0.16 [c]
แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด	9.50±0.11 [b]
แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือก	4.43±0.15 [a]
แป้งถั่วเหลือง	30.06±0.27 [e]
แป้งสาลี	7.42±0.09 [b]

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)



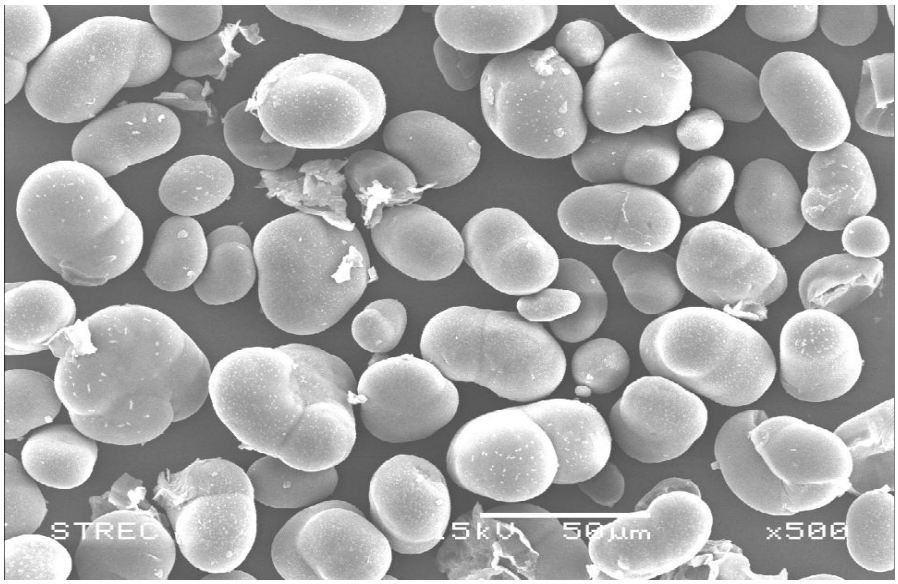
หมายเหตุ : BBF = แป้งถั่วแดงหลวง , RBBF = แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก , SBF = แป้งถั่วนิ้วนางแดง RSBF = แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก , SF = แป้งถั่วเหลือง , และ WF = แป้งสาลี

รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกน้ำ (% syneresis) ของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลืองและแป้งสาลี

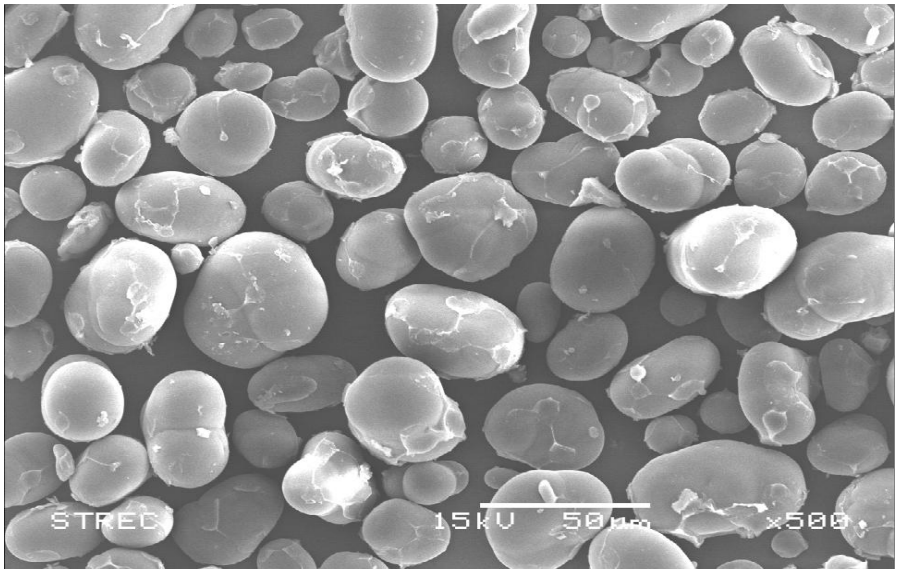
4.5 สมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชถั่วแดง

4.5.1 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ช (granule) ขนาดเล็ก เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็คตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดสตาร์ชมีขนาด และลักษณะรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของพืชนั้นๆ เมื่อนำสตาร์ชจากถั่วแดงมาทำการตรวจ พบว่าเม็ดสตาร์ชจากถั่วแดงมีรูปร่าง 3 แบบ คือ แบบเป็นวงรี แบบมีรอยเว้าคล้ายเม็ดถั่ว และแบบทรงกลม ผิวของสตาร์ชไม่เรียบ เนื่องจากถั่วแดงมีปริมาณโปรตีนสูง เมื่อนำมาทำการผลิตเป็นสตาร์ช จะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์สกัดโปรตีนออกไป จึงอาจมีโปรตีนที่สกัดออกไปไม่หมดติดอยู่บริเวณของเม็ดสตาร์ชดังภาพที่ 4.9 และ 4.10

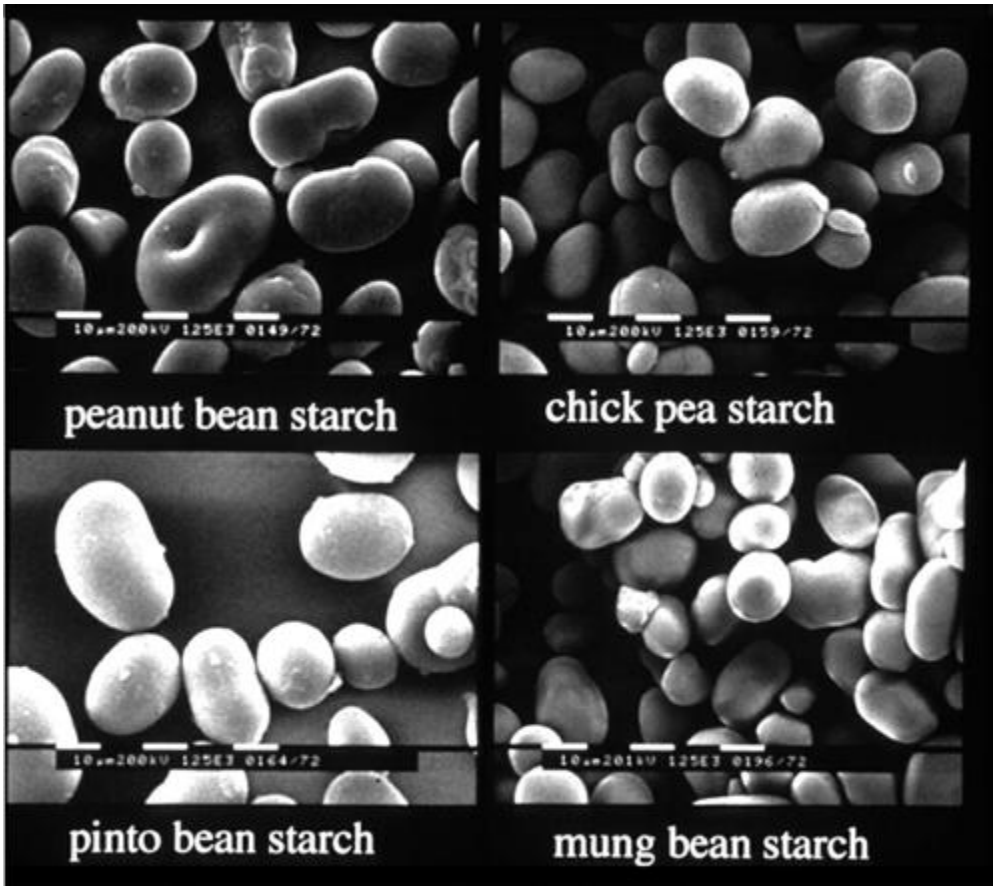


ภาพที่ 4.9 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากถั่วแดงหลวงที่ทำการตรวจวัดด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 4.10 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากถั่วนิ้วนางแดงที่ทำการตรวจวัดด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากถั่วแดงและสตาร์ชจากถั่วชนิดต่างๆ ได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วลูกไก่ ถั่วพินโต และถั่วเขียว ที่ศึกษาโดย Wen และ Martha (2004) ดังแสดงภาพที่ 4.11 พบว่ารูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากถั่วแดงมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากถั่วลูกไก่ ถั่วพินโต และถั่วเขียวคือมีรูปร่างเป็นวงรี และแบบมีรอยเว้า แต่แตกต่างจากเม็ดสตารช์จากถั่วลิสง ซึ่งจะรอยบุ๋มบนเม็ดสตาร์ช

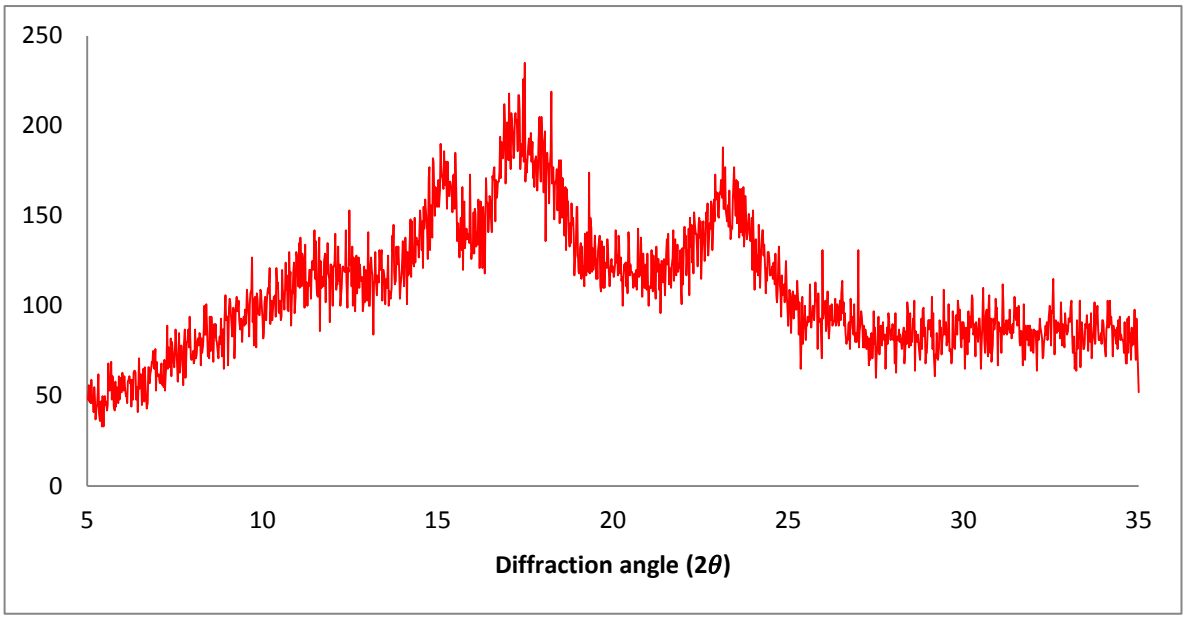


ภาพที่ 4.11 รูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากถั่วชนิดต่างๆที่ทำการตรวจวัดด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
ที่มา : Wen-Chieh และ Martha (2004)

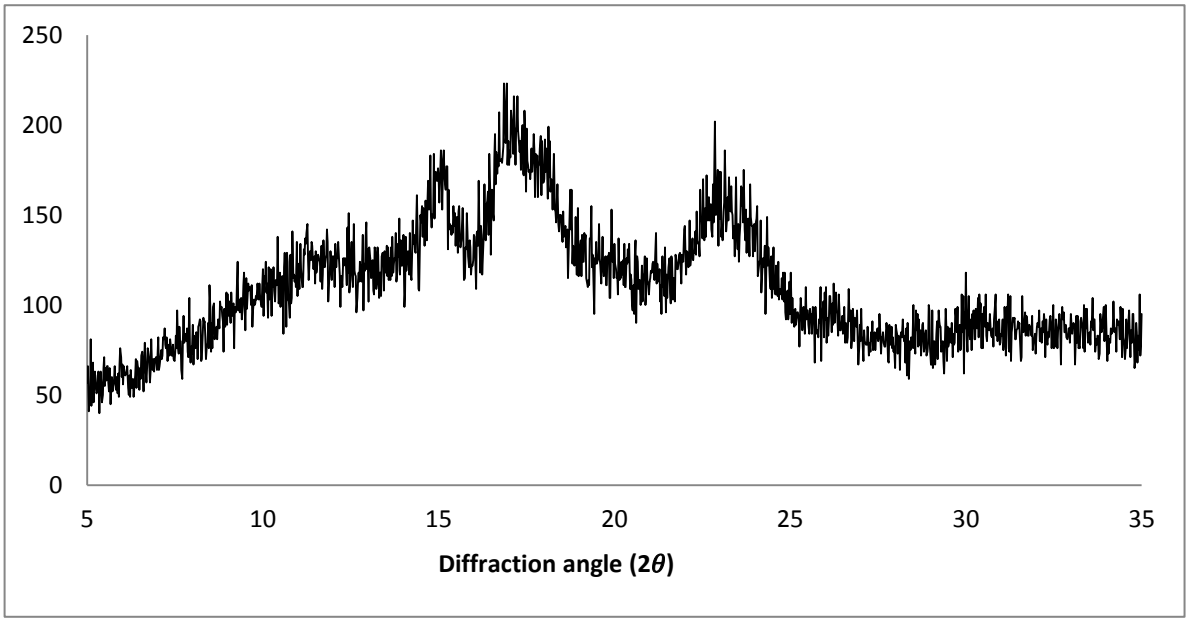
4.5.2 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

การวิเคราะห์โครงสร้างและปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชถั่วแดง โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer เพื่อศึกษารูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของสตาร์ชจากถั่วแดง (ภาพที่ 4.12 และ ภาพที่ 4.13) พบว่าสตาร์ชถั่วแดงหลวงมีปริมาณผลึกเท่ากับ 31.58 เปอร์เซ็นต์ และสตาร์ชถั่วนิ้วนางแดงมีปริมาณผลึกเท่ากับ 28.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่บริเวณใต้พีคส่วนบนต่อพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัมที่วัดได้ การที่สตาร์ชจากถั่วแดงหลวงมีปริมาณผลึกมากกว่าสตาร์ชจากถั่วนิ้วนางแดง อาจเนื่องมาจากสตาร์ชจากถั่วแดงหลวงปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าสตาร์ชจากถั่วนิ้วนางแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โครงสร้างผลึก (crystallininity) ของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชถั่วแดงมีการเรียงตัวเป็นแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 15° , 17° และมีพีคคู่ (doublet) ที่ 22° และ 24° เมื่อนำสตาร์ชจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดงมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ดังแสดงผลในตารางที่ 4.10 พบว่าสตาร์ชจากถั่วแดงหลวงและถั่วนิ้วนางแดง มีพีคเดี่ยวที่ 15°, พีคคู่ที่ 17 ° และพีคคู่ที่ 22°และ 24 ° เช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ ภาพที่ 4.13 ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A

สอดคล้องกับสตาร์ชจากถั่วหรั่ง (Sirivongpaisal, 2008) ที่แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชจากถั่วแดงมีความหนาแน่นในการจัดเรียงของเกลียวคู่มากกว่าสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่วทั่วไป จึงเกิดโครงสร้างผลึกแบบ A เช่นเดียวกับสตาร์ชจากถั่วหรั่ง



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากถั่วแดงหลวง



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากถั่วนิ้วนางแดง

ตารางที่ 4.10 พีคที่เกิดขึ้นของสตาร์ชจากถั่วแดงเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer

สตาร์ชจากถั่วแดงหลวง [°angle (2θ)]	สตาร์ชจากถั่วนิ้วนางแดง [°angle (2θ)]
15.1°	15.1°
17.2°	17.0°
18.0°	18.2°
22.5°	22.5°
23.0°	23.0°
23.8°	23.8°

4.6 ผลการศึกษาปริมาณแป้งถั่วแดงที่เหมาะสมในการผลิตแครกเกอร์

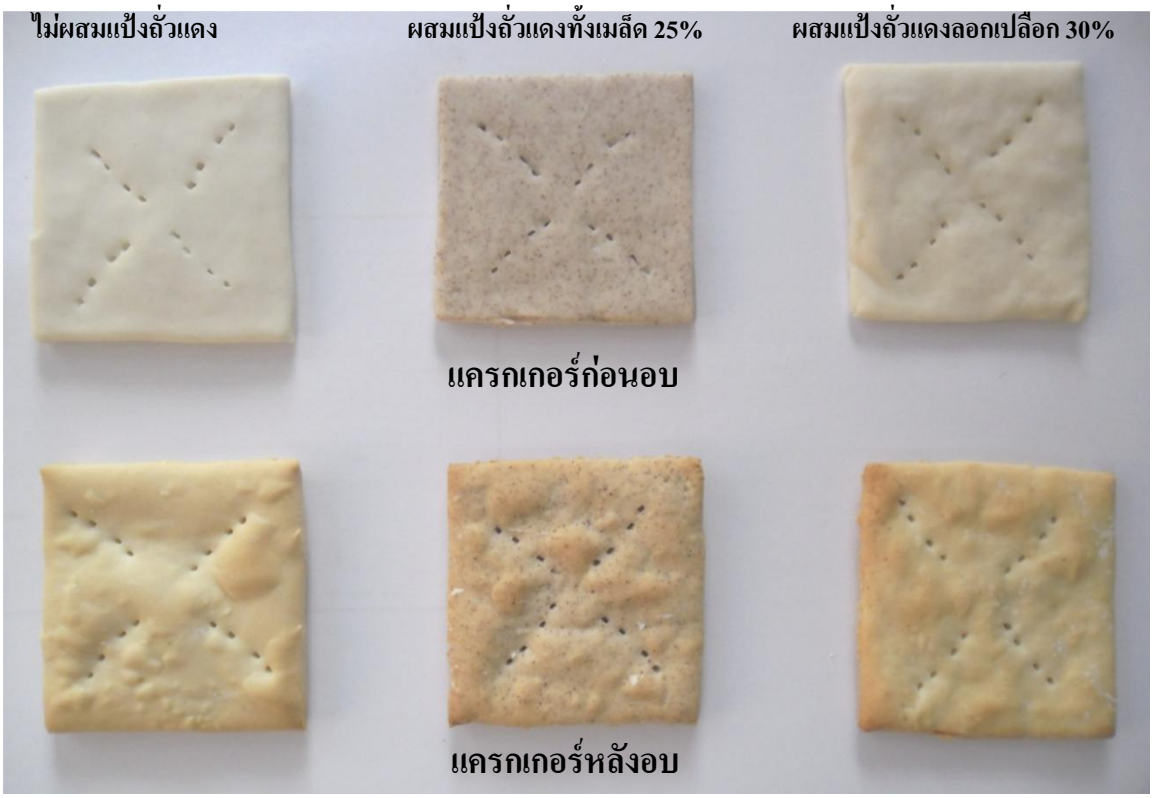
4.6.1 สมบัติทางกายภาพของแครกเกอร์

ในการทดลองได้ใช้แป้งที่ทำจากถั่วแดงหลวงในการผลิตแครกเกอร์ เนื่องจากแป้งถั่วแดงหลวงมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าแป้งถั่วนิ้วนางแดง และสามารถลอกเปลือกออกได้ง่ายกว่าถั่วนิ้วนางแดง ซึ่งเป็นถั่วเมล็ดเล็ก โดยทดลองใช้แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก มาทดแทนแป้งสาลีในปริมาณต่างๆ โดยในกรณีแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดทดแทนแป้งสาลีในปริมาณ 20 , 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้งสาลี และในกรณีแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกทดแทนแป้งสาลีในปริมาณ 25 , 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้งสาลี การทดแทนแป้งถั่วแดงในส่วนแป้งหมักที่ใช้ในการทำแครกเกอร์ พบว่าสามารถทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงทั้งเมล็ดได้มากที่สุดประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ และแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออกได้มากที่สุดประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ โดยลักษณะของเนื้อโดยังคงเนียน เมื่อใช้เครื่องรีดสามารถรีดเป็นแผ่นได้ดี สามารถตัดแครกเกอร์ออกมาเป็นชิ้นๆได้ ทำให้ได้แครกเกอร์ที่มีรูปร่างสวยงาม แต่แครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงในปริมาณที่มากกว่านี้ เมื่อนำโดไปเข้าเครื่องรีด แผ่นแป้งจะขาดง่าย เนื้อของโดมีลักษณะร่วนและแห้ง ทำให้รูปทรงของแครกเกอร์ไม่สวยงามและไม่สม่ำเสมอ ทำการตรวจสอบการขึ้นฟู ลักษณะเนื้อสัมผัส และค่าสีของแครกเกอร์ที่ผลิตได้แสดงผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางกายภาพของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออกในปริมาณต่างๆ

แป้งถั่วแดง (%)	การขึ้นฟู (%)	ความกรอบ (g.f)	ค่าสี		
			L	a*	b*
0%	43.15±1.71 [c]	3.54±0.24[d]	75.38±0.35 [c]	2.64±0.19 [a]	3.78±0.24 [a]
ทั้งเมล็ด 20 %	41.63±2.53[b]	3.35±0.19[c]	72.88±0.32 [b]	4.37±0.40 [c]	5.90±0.13 [b]
ทั้งเมล็ด 25 %	41.73±1.20 [b]	3.22±0.21[b]	70.84±0.19 [a]	4.47±0.43[c]	6.78±0.39 [c]
ทั้งเมล็ด 30 %	39.70±2.97 [a]	3.14±0.17[a]	69.03±0.75 [a]	4.55±0.22 [c]	7.30±0.17[c]
ลอกเปลือก 25 %	42.20±1.28 [b]	3.24±0.18[b]	73.26±0.30 [b]	3.80±0.11 [b]	3.54±0.11[a]
ลอกเปลือก 30 %	40.62±1.17 [a]	3.12±0.19[a]	72.11±0.10 [b]	3.65±0.13 [b]	3.56±0.05 [a]
ลอกเปลือก 35 %	39.51±1.81 [a]	3.03±0.17 [a]	70.23±0.12 [a]	3.67±0.11 [b]	3.74±0.07 [a]

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)



ภาพที่ 4.14 ผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ก่อนและหลังอบ

1) การขึ้นฟูของแครกเกอร์

การขึ้นฟูของแครกเกอร์บ่งบอกถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครกเกอร์ที่ผลิตได้หลังจากอบ ดังภาพที่ 4.14 ซึ่งหากมีอัตราการขึ้นฟูสูงแสดงว่าโครงสร้างของกลูเตนภายในโดมีความแข็งแรง ทำให้สามารถเก็บกักอากาศได้มาก แครกเกอร์จึงขึ้นฟู แป้งจะกรอบร่วน แต่หากมีอัตราการขึ้นฟูต่ำแสดงว่าโครงสร้างของ กลูเตนภายในโดมีความแข็งแรงลดลง จึงไม่สามารถเก็บกักอากาศเอาไว้ได้มากนัก เนื้อแป้งจะค่อนข้างแน่น การใช้แป้งถั่วแดงหลวงทดแทนการแป้งสาลีในการผลิต ส่งผลทำให้แครกเกอร์ขึ้นฟูน้อยลง หากเพิ่มปริมาณการใช้แป้งถั่วแดงหลวงทดแทนการแป้งสาลี แครกเกอร์ที่ผลิตได้จะมีอัตราการขึ้นฟูลดลง ดังตารางที่ 4.11

การที่โดของแป้งที่ใช้แป้งถั่วแดงมีความแข็งแรงลดลง และมีความยืดหยุ่นลดลง เป็นผลให้การขึ้นฟูของแครกเกอร์ลดลง อาจเป็นผลมาจากการทดแทนแป้งสาลี ทำให้ปริมาณกลูเตนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของโดมีปริมาณลดลง ถึงแม้แป้งถั่วแดงจะมีปริมาณโปรตีนสูง แต่โปรตีนในพืชตระกูลถั่วประกอบด้วยโปรตีนโกลบูลินและอัลบูมินเป็นส่วนใหญ่ (ยุพร และ กานดา, 2549)

2) ลักษณะเนื้อสัมผัสของแครกเกอร์

การวัดเนื้อสัมผัสของแครกเกอร์ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส จะพิจารณาจากค่าความกรอบ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงแรงที่ใช้ในการทำให้แครกเกอร์หักออกจากกัน หากค่าที่วัดได้มีมากแสดงว่าแครกเกอร์นั้นมีค่าความกรอบมาก โดยนำแครกเกอร์สูตรมาตรฐานที่ไม่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงเปรียบเทียบกับแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง พบว่าแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน จะมีความกรอบมากที่สุด เห็นได้จากการที่ค่าความกรอบของแครกเกอร์สูตรมาตรฐานสูงที่สุด แสดงว่าต้องใช้แรงมากในการที่จะทำให้แครกเกอร์หักออกจากกัน และแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกที่ระดับ 35 เปอร์เซ็นต์มีความกรอบน้อยที่สุด การใช้แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด และแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกทดแทนการใช้แป้งสาลีในการผลิตแครกเกอร์ ส่งผลให้ความกรอบของแครกเกอร์ลดน้อยลง เนื่องมาจากการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงในการผลิตแครกเกอร์ ทำให้โครงสร้างโดของแป้งมีความแข็งแรงลดลง และมีความยืดหยุ่นลดลง จึงส่งผลต่อการผลิตแครกเกอร์ ทำให้ขั้นตอนการรีดแป้งทำได้ยากขึ้น

3) ค่าสีของแครกเกอร์

ผลทำการตรวจสอบค่าสี (L*, a*, b*) ของแครกเกอร์ด้วยเครื่องวัดสี พบว่าแครกเกอร์สูตรมาตรฐานมีค่าความสว่าง (L*) สูงสุด แต่ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) ต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.11) การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงจะทำให้ค่าความสว่างลดลง แครกเกอร์มีสีน้ำตาลเข้มขึ้นค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสีของแป้งถั่วแดงหลวงเข้มกว่าสีของแป้งสาลี ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดที่ระดับ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความสว่าง (L*) ต่ำที่สุด แต่มีค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) สูงที่สุด เนื่องจากเป็นแป้งถั่วแดงหลวงที่ผลิตจากถั่วแดงทั้งเมล็ด มีเปลือกของถั่วแดงผสมอยู่

4.6.2 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสามสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 20 , 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ กับแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 25 , 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐานที่ไม่มีแป้งถั่วแดง ทดสอบด้วยผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน โดยผู้ทดสอบที่ใช้ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน คุณลักษณะที่ทดสอบคือ สี กลิ่น การเรียงตัวเป็นชั้นของแป้ง เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมด้วยวิธี 7 points hedonic scale เพื่อเลือกสูตรการผลิตแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงที่ดีที่สุด และเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบชิม ดังตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.12 การทดสอบยอมรับทางประสาทสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงทั้งเมล็ดเปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน

แป้งถั่วแดง	สี	กลิ่น	การเรียงตัวเป็นชั้นของแป้ง	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
0%	6.1±0.74 [b]	6.2±0.63 [b]	6.4±0.52 [b]	6.0±0.82 [b]	6.1±0.88 [b]
ทั้งเมล็ด 20%	4.9±0.74 [a]	5.7±0.82 [b]	5.7±0.48 [b]	5.5±0.97 [a]	5.7±0.82 [b]
ทั้งเมล็ด 25%	5.7±0.82 [b]	5.4±0.84 [a]	5.3±0.67 [a]	5.3±0.67 [a]	5.6±0.52 [b]
ทั้งเมล็ด 30%	4.5±0.71 [a]	5.0±0.82 [a]	4.6±0.70 [a]	4.6±0.84 [a]	4.9±0.57 [a]

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ตารางที่ 4.13 การทดสอบยอมรับทางประสาทสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงที่ลอกเปลือกออกเปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน

แป้งถั่วแดง	สี	กลิ่น	การเรียงตัวเป็นชั้นของแป้ง	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
0%	6.0±0.61 [b]	6.2±0.73 [b]	6.3±0.52 [b]	6.0±0.92 [b]	6.2±0.67 [b]
ลอกเปลือก 25%	5.2±0.92 [a]	6.1±0.88 [b]	5.9±0.99 [b]	5.6±0.84 [a]	5.8±0.92 [b]
ลอกเปลือก 30%	5.9±0.88 [b]	5.9±0.88 [b]	5.6±0.70 [a]	5.5±0.71 [a]	5.7±0.82 [b]
ลอกเปลือก 35%	4.9±0.74 [a]	5.2±0.63 [a]	4.9±0.57 [a]	5.0±0.67 [a]	5.2±0.42 [a]

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดที่ปริมาณการทดแทนต่างๆกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน พบว่าสีของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 25 เปอร์เซ็นต์ กลิ่นและการเรียงตัวเป็นชั้นของแป้งของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 20 เปอร์เซ็นต์ ความชอบโดยรวมของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน แต่เนื้อสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน

เมื่อเปรียบเทียบแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกที่ปริมาณการทดแทนต่างๆกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน ดังสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าสีของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้ง

สาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 30 เปอร์เซ็นต์ กลิ่นและความชอบโดยรวมของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ การเรียงตัวเป็นชั้นของแป้งของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 25 เปอร์เซ็นต์ ความชอบโดยรวมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน แต่เนื้อสัมผัสของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน

การใช้แป้งถั่วแดงหลวงและแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกทดแทนแป้งสาลีมีผลทำให้การเรียงตัวเป็นชั้นของแป้งของแครกเกอร์ลดลง เนื่องจากแป้งถั่วแดงหลวงและแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกมีปริมาณโปรตีนมากกว่าแป้งสาลี อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าแป้งสาลี แต่มีกำลังการพองตัวน้อยกว่าแป้งสาลี จึงส่งผลถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครกเกอร์ด้วย และสามารถใช้แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกทดแทนแป้งสาลีในการการผลิตแครกเกอร์ได้มากกว่าการใช้แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด อาจเนื่องมาจากแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าแป้งถั่วแดงหลวงเปลือกของถั่วอุดมไปด้วยใยอาหาร (fiber) (มาลี, 2542) เมื่อลอกเปลือกออกจึงต้องใช้ถั่วแดงมากขึ้นในการผลิตแป้งจึงส่งผลให้แป้งมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น

สรุปได้ว่าผู้ชิมส่วนใหญ่ให้การยอมรับแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยเปรียบเทียบกับสูตรมาตรฐาน แต่งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของแครกเกอร์ ดังนั้นจึงเลือกแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 25 เปอร์เซ็นต์ และแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 30 เปอร์เซ็นต์ มาทำการศึกษาต่อไป

4.6.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์เกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง

ผลิตแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 25 เปอร์เซ็นต์ แครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 30 เปอร์เซ็นต์ และแครกเกอร์สูตรมาตรฐานที่ไม่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง แล้วนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์โดยใช้การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า และเยื่อใยด้วยวิธีของ AOAC (2000) โดยเปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน พบว่าได้ผลดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์ที่ทดแทนสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออกเปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน

องค์ประกอบ	สูตรมาตรฐาน	ทดแทนด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดที่ 25%	ทดแทนด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกที่ 30%
คาร์โบไฮเดรต	76.35±0.50[b]	73.71±0.31[a]	72.01±0.05[a]
โปรตีน	10.85±0.07[a]	11.96±0.14[b]	12.74±0.12[c]
ไขมัน	9.85±0.15[a]	10.41±0.16[b]	11.47±0.05[c]
เยื่อใย	1.09±0.11[a]	1.45±0.02[c]	1.33±0.02[b]
เถ้า	1.86±0.04[a]	2.47±0.01[b]	2.45±0.03[b]

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวนอนแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด 25 เปอร์เซ็นต์ แครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก 30 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน พบว่าแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออกมีปริมาณโปรตีน เยื่อใย และเถ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต ($p<0.05$) มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และพบว่าปริมาณไขมันในแคกเกอร์ทั้งสามสูตรนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เนื่องมาจากแป้งสาลีมีปริมาณไขมันน้อยกว่าแป้งถั่วแดง ดังนั้นเมื่อใช้แป้งถั่วแดงทดแทนแป้งสาลีจึงทำให้แครกเกอร์มีปริมาณไขมันเพิ่มมากขึ้น

การเพิ่มปริมาณของแป้งถั่วแดงที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีในแครกเกอร์ คุณค่าทางโภชนาการของแครกเกอร์เพิ่มขึ้นหลายด้าน เช่น มีปริมาณโปรตีนเถ้าและเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้น และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงเมื่อเทียบกับแครกเกอร์สูตรมาตรฐาน จากการข้อมูลของ American Heart Association (1986) นำเสนอว่าการเพิ่มปริมาณโปรตีน และลดคาร์โบไฮเดรตในอาหารที่รับประทานจะช่วยลดความเสียงของการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจได้และการเพิ่มโปรตีน และเส้นใยอาหารจะช่วยลดการดูดซึมของน้ำตาล ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้นช้าลง จึงเหมาะกับบุคคลที่ต้องการควบคุมระดับของน้ำตาลในเลือด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. แป้งที่ผลิตจากถั่วแดงหลวง และถั่วนิ้วนางแดงเป็นแป้งที่มีปริมาณโปรตีนสูง (21-27%) และคาร์โบไฮเดรตสูง (63-69%) แต่มีปริมาณไขมันต่ำ (0.4-2.2%) แป้งถั่วแดงทั้งเมล็ดจะมีปริมาณเยื่อใยและเถ้าสูงกว่าแป้งถั่วแดงลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงมีปริมาณอะไมโลสและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าแป้งถั่วแดงหลวง

2. แป้งที่ผลิตจากถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด ถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก ถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด ถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลือง และแป้งสาลีทางการค้า มีความสามารถในการดูดซับน้ำเท่ากับ 2.23 , 2.40 , 2.12 , 2.32 , 2.77 และ 1.41 กรัมของน้ำต่อกรัมของแป้ง ตามลำดับ แป้งถั่วแดงหลวงมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าแป้งถั่วนิ้วนางแดง รูปแบบกำลังการพองตัวของแป้งถั่วแดงเป็นแบบสองขั้น (two stage swelling pattern) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลือง และแป้งสาลี มีกำลังการพองตัวเท่ากับ 10.28 , 9.30 , 12.07 , 11.91 , 6.01 และ 12.24 กรัมต่อกรัมของแป้ง ตามลำดับ แป้งจากถั่วแดงหลวงมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 27-35 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง และแป้งจากถั่วนิ้วนางแดงมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 25-32 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง แป้งสาลีทางการค้ามีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 13-17 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง และแป้งถั่วเหลืองมีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายอยู่ระหว่าง 42-53 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง

3. การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งถั่วแดงพบว่าแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก กับแป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออก อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ของการเกิดเจลาติไนเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) มีค่าใกล้เคียงกัน

4. เม็ดแป้งของแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออกมีกำลังการพองตัวน้อย เม็ดแป้งของแป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ดและลอกเปลือกออกและแป้งสาลีที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง เมื่อตรวจวิเคราะห์แล้วไม่พบความเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างที่มีการให้ความร้อน
เมื่อนำสารละลายถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลือง และแป้งสาลี มาทำการแช่เยือกแข็งและละลาย พบว่า

แป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ด แป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออก แป้งถั่วนิ้วนางแดงทั้งเมล็ด แป้งถั่วนิ้วนางแดงลอกเปลือกออก แป้งถั่วเหลือง และแป้งสาลี มีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกน้ำเท่ากับ 17.36 , 11.97 , 9.50 , 4.43 , 30.06 และ 7.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5. สตาร์ชที่ผลิตจากแป้งถั่วแดงหลวงและแป้งถั่วนิ้วนางแดงมีรูปร่างเป็นแบบวงรี แบบมีรอยเว้าคล้ายเม็ดถั่ว และแบบทรงกลม เมื่อวิเคราะห์ปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer พบว่าโครงสร้างผลึก (crystallininity) ของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชถั่วแดงมีการเรียงตัวเป็นแบบ A และมีปริมาณผลึกของสตาร์ชถั่วแดงหลวงมีปริมาณผลึกเท่ากับ 31.58 เปอร์เซ็นต์ และสตาร์ชถั่วนิ้วนางแดงมีปริมาณผลึกเท่ากับ 28.42 เปอร์เซ็นต์

6. ผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงจะทำให้อัตราการขึ้นฟูของแครกเกอร์ และการเรียงตัวเป็นชั้นของแป้งของแครกเกอร์ลดลง แต่สีของแครกเกอร์ที่ผ่านการอบจะเข้มขึ้น โดยอัตราการขึ้นฟู และการเรียงตัวเป็นชั้นของแป้งของแครกเกอร์จะแปรผกผันกับปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดง ผู้ชิมส่วนใหญ่ให้คะแนนความชอบแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงทั้งเมล็ดที่ระดับ 20 และ 25 เปอร์ซ็นต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวงลอกเปลือกออกที่ระดับ 25 และ30 เปอร์ซ็นต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

7. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแครกเกอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงหลวง พบว่าแครกเกอร์มีปริมาณโปรตีน ไขมัน ใยอาหาร และเถ้าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลง

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. ปริมาณโปรตีน ไขมัน และแคลเซียมจากพืช. สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กลุ่มงานพัฒนาพื้นที่สูง 2550. ถั่วแดงหลวง. กองพัฒนาการเกษตรพื้นที่เฉพาะ กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

จุฑา พีรพัชระ. 2544. การใช้แป้งข้าวกล้องในผลิตภัณฑ์ขนมอบ. วารสารวิจัยและฝึกอบรมสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 3:11-20.

ชุติมา ไชยเชาวน์, หทัยรัตน์ ปิ่นแก้ว, วารุณี คุปต์กาญจนากุล และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2554. ผลของการใช้แป้งข้าวดัดแปรในการผลิตเค้กกล้วยหอม. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 49, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 1-4 ก.พ. 2554.

บุญทิวา นิลจันทร์. 2548. การศึกษาเคมีฟิสิกส์ของฟลาวและสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์ต่างๆในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยะรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล. 2545. การศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้างและสมบัติของแป้งและสตาร์ชจากถั่วหรั่งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนามูลค่าผลิตภัณฑ์เพิ่ม. รายงานวิจัยสนับสนุนโครงการวิจัย ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.

นวรัตน์ เศรษฐสุวรรณ, น้ำตาล เนื่องจำนงค์ และอโนชา สุขสมบูรณ์. 2553. การพัฒนาผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ข้าวเหนียว (อาราเร่) จากข้าวเหนียวดำ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 41:165-168.

นาค โพธิ์แท่น. 2537. ถั่วนิ้วนางแดง. สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กองเกษตรสัมพันธ์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

พนอจิต ธัญญมงคลพงศ์. 2531. การแยกอะไมโลสออกจากแป้งข้าวเจ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มาลี ซิ้มศรีสกุล. 2542. การสกัดเส้นใยอาหารจากกากถั่วเหลือง เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. รายงานวิจัย ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ.

กองบรรณาธิการนิรนาม. 2540. มหัศจรรย์เมล็ดงอก พลังอาหาร พลังชีวิต เกษตรกรรมธรรมชาติ. 17-34.

เว็บบอร์ดไทยเกษตรศาสตร์. 2554. การปลูกถั่วนิ้วนางแดงในระบบปลูกพืชเศรษฐกิจ. เข้าถึงได้จาก http://www.thaikasetsart.com/ถั่วการปลูกถั่วนิ้วนาง (25 มกราคม 2556).

ยุพร พืชกมุทร และกานดา แซ่จิว. 2549. การใช้ประโยชน์จากโอคาราเพื่อทดแทนแป้งสาลีในคุ้กกี้เนย วารสารพระจอมเกล้า. 3:30-36.

ศยามล เนตรประภา. 2544. การพัฒนาเครื่องดื่มข้าวหอมมะลิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น. 2539. ถั่วนิ้วนางแดง (rice bean). ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์กรุงเทพมหานคร. 1-24.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2538. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขนมปังกรอบ มอก. 742. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

สุนีย์ โชตินีรนาท, กำไล เลาหพัฒนาเลิศ, เอ็จ สโรบล และกล้าณรงค์ ศรีรอต. 2543. สมบัติทางฟิสิกส์เคมีของแป้งถั่วเขียวที่สกัดจากพันธุ์ที่พัฒนาในประเทศไทย. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 1-4 กุมภาพันธ์ 2543.

สิงห์คำ ธิมา และกรีฑา ดอนเลย. 2555. การเตรียมสารสกัดหยาบจากถั่วแดงเพื่อศึกษาการกระตุ้นการเจริญเติบโตและการแบ่งตัวของเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดนิวเคลียสเดี่ยว. วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่. 45:23-31.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Adebowale, K.O., T.A. Afolabi, and O.S. Lawal. 2002. Isolation, chemical modification and physicochemical characterisation of bambara groundnut (*Voandzeia subterranean*) starch and flour. Food Chemistry. 78:305-311.

Adebowale, K.O., and O.S. Lawal. 2004. Comparative study of the functional properties of bambara groundnut (*Voandzeia subterranean*), jack bean (*Cana valiaensiformis*) and mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flour. Food Research International. 37:355-365.

Alex, A.A., A.R. Kelly, L. OdeanM, R.F. Gary, and D.A. Susan. 2008. Influence of added bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.) on some physical and nutritional properties of wheat flour tortillas. Food Chemistry. 109:33-41.

Alex, A.A., R.F. Gary, and D.A. Susan. 2009. Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. Food Chemistry. 113:989-996.

Amarteifio, J.O., and D. Moholo. 1998. The chemical composition of flour legumes consumed in Botswana. Journal Food Chemistry and Analysis. 11:329-332.

American Heart Association. 1986. Dietary guidelines for healthy American adults: a statement for physicians and health professionals by the Nutrition Committee. Circulation. 74:1465-1468.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland.

Appelqvist, A.M., and M.R.M. Debet. 1997. Starch biopolymer interaction review. Food Reviews International. 13(2):163-224.

Beynum, G.M.A.,and J.A. Roels. 1985. Starch Conversion Technology, Marcel Dekker Inc., New York.

Blanshard, J. 1987. Starch granule structure and function. Critical Review of Applied Chemistry. 13:16-54.

Buleon, A., P. Colonna, V. Planchot, and S. Ball. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. International Journal of Biology Macromolecules. 23:85-112.

Czuchajowska, Z., A. Klamczynski, B. Paszezynska, and B.K. Bail. 1998. Structure and functionality of barley starches. Cereal Chemistry. 75:747-754.

Doublier, J.L. 1981. Rheological studies on starch flow behavior of wheat starch pastes. Starch/Staerke. 33(12):415-420.

Fan, J., and B.P. Mark. 1998. Retrogradation kinetics of rice flours as influenced by cultivar. Cereal Chemistry. 75(1):153-155.

Gonera, A., P. Cornillon. 2002. Gelatinization of starch/gum/sugar systems studied by using DSC, NMR and CSIM. Starch/Starke. 54:508-516.

Gujska, E., D. Reinhard, and K. Khan. 1994. Physicochemical properties of field pea, pinto and navy bean starches. Journal of Food Science. 59:634-636.

Gunaratne, A., and R. Hoover. 2002. Effect of heat moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymer. 49:425-437.

Herwaiker, V.R., and C.Y. Ma. 1990. Thermal analysis of foods. Elsevier Applied Science. London, U.K.

Hoover, R., and W.S. Ratnayake. 2002. Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivar grown in Canada. Food Chemistry. 78:489-498.

Horton H.R., L.A. Moran, R.S. Ochs, J.D. Rawn, and K.G. Scrimgeour. 1996. Principles of Biochemistry. Prentice-Hall Inc., New Jersey.

James, W.R. 1999. Carbohydrate chemistry for food scientists. Eagan Press Inc., Minnesota.

Jeeyup (Jay), H., A.M.J. Jennifer, and G. Mindy. 2010. Development of gluten-free cracker snacks using pulse flours and fractions. Food Research International. 43:62-633.

Juliano, B.O., C.M. Perez, A.B. Blakeney, T. Castillo, N. Kongseree, and B. Laignelet. 1981. International cooperative testing on the amylase content of milled rice. Starch/Starke. 33:157-162.

Kasemsuwan, T., J. Jane, Y.Y. Chen, L.F. Lee, A.E. Pherson, K.S. Wong, and M. Radosavljevic. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chemistry. 76(5):629-637.

Kerr, R.W. 1950. Chemistry and industry of starch. 2nd ed. Academic Press Inc., New York.

King, A.J. 2005. High pressure processing of corn and wheat starch. Ph.D Thesis. Ohio State University. U.S.

Kokini, L.J., L. Shiuh, and L.L. Chedid. 1992. Effect of starch structure on starch rheological properties. Food Technology. 46:124-139.

Madhujith, T., and F. Shahidi. 2005. Antioxidant potential of pea beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Food Science. 70:85-89.

Mota, R.V., F.M.D. Lajolo, C. Ciacco, and B.R. Cordenunsi. 2000. Composition and functional properties of banana flour from different varieties. Starch/Starke. 52(2-3):63-68.

Nielsen, S.S. 1998. Food analysis. 2nd ed. Aspen Publishers Inc., Gaithersburg.

Niba, L.L., M.M. Bokanga, F.L. Jacson, D.S. Schlimmem, and B.W. Li. 1994. Physical properties and starch granular characteristics various *Monihot Esculenta* (Cassava) genotypes. Cereal Chemistry.54:548-453.

Oates, C.G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. Food Science and Technology. 8:375-382.

Padila, F.C., M.T. Alvarez, and M.J. Alfaro. 1996. Functional properties of barinas nut flour (*Caryodendron orinocense* Karst., Euphorbiaceae) compared to those of soybean. Food Chemistry. 57:191-196.

Pomeranz, Y. 1991. Functional properties of food components. 2nd ed. Academic Press Inc., New York.

Rehman, Z., A.M. Salariya, and S.I. Zafar. 2001. Effect of processing on available carbohydrate content and starch digestibility of kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Food Chemistry. 73:351-353.

Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starch. Methods in Carbohydrate Chemistry. 106-108.

Schoch, T.J., and F.C. Maywald. 1964. Preparation and properties of various legume starch. Cereal Chemistry. 45:564-573.

Shimelis, E.A., and S.K. Rakshit. 2007. Effect of processing on antinutrients and in vitro protein digestibility of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in East Africa. Food Chemistry. 103:161-172.

Siddiq, M., M. Nasir, R. Ravi, K.D. Dolan, and M.S. Butt. 2010. Effect of defatted maize germ addition on the functional and textural properties of wheat flour. International Journal of Food Properties. 12(4):1-11.

Singh, J. 2003. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. Food Hydrocolloids. 17:63-72.

Sirivongpaisal, P. 2008. Structure and functional properties of starch and flour from bambarra groundnut. Songklanakarin Journal Science Technology. 30(1):51-56.

Swinkels, J.J.M. 1985a. Composition and properties of commercial native starches. Starch/Starke. 37:1-5.

Swinkels, J.J.M. 1985b. Sources of starch, its chemistry and physics. Starch Conversion Technology. 37:15-45.

Terrence, M., and S. Fereidoon. 2005. Antioxidant Potential of Pea Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Food Science. 70(1):85-90.

Tester, F.R. 1997. Starch: The Polysaccharide Fractions. In P.J. Frazies, A.M. Donald, and P. Richmond. (eds) Starch: Structure and Functionality. The Royal Society of Chemistry, U.K. 147-163.

Tester, F.R. and Karkalas, J. 2002. Starch . In E.J. Vandamme, S.D. Beaets, and A. Steinbuchel. (eds) Biopolymers: Polysaccharides from Eukaryotes. Wiley-VCH, Germany. 6:381-438.

Toe, H.C., A.A. Karim., P.B. Cheah, M.H. Norziah, and C.C. Seow. 2000. On the role protein and starch in the aging of non-waxy rice flour. Food Chemistry. 60:229-236.

Vargas T.A., D.P. Osorio, H.J. Islas, J. Tovar, L.O. Paredes, and P.L. Bello. 2004. Starch digestibility of five cooked black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties. Journal of Food Composition and Analysis. 17:605-612.

Wang, H.H., D.W. Sun, Q. Zeng, and Y. Lu. 2000. Effect of pH, corn starch and phosphates on the pasting properties of rice flour. Journal Food Engineering. 46:133-138.

Wen, C.S., and S. Martha. 2004. Characterization of legume starches and their noodle quality. Journal of Marine Science and Technology. 12(1):25-32.

Ye, X.Y., T.B. Ng, W.K. Tsang, and J. Wang. 2001. Isolation of a homodimeric lectin with antifungal and antiviral activities from red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds. Journal of Protein Chemistry. 20:367-375.

Yoenyongbudchangul, S., and A. Noomhorm. 2002. Effect of physical properties of high amylose Thai rice flours on vermicelli qualities. Cereal Chemistry.79:481-485.